

Grado Universitario Ingeniería Mecánica
2017-2018

Trabajo Fin de Grado

“PROTECCIONES PERSONALES DE ARAMIDA REFORZADO CON STF ANTE ARMA BLANCA”

Liu Jiao Wang

Tutores:

Marcos Rodríguez Millán

José Antonio Loya Lorenzo

Edificio 7.1. J02 día 06/07/2018



[Incluir en el caso del interés de su publicación en el archivo abierto]

Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**

RESUMEN

Existe un gran interés en el desarrollo de protecciones personales flexibles empleando tejidos de alta resistencia. Debido a las propiedades reológicas de los fluidos dilatantes, es una nueva tendencia combinar dichos fluidos con los clásicos materiales utilizados en protecciones personales, aumentando su resistencia sin disminuir su flexibilidad y ergonomía.

El objetivo principal de este trabajo es comprobar cómo afectan distintos parámetros de fabricación de tejidos de aramida reforzado con STF (Shear Thickening Fluid) a su capacidad de protección ante amenaza de arma blanca.

Los principales materiales involucrados en la fabricación de estas protecciones son: tejido aramida, nano partículas de SiO_2 , etanol y polietilenglicol (PEG200). Para analizar el efecto de algunos parámetros de fabricación, se fabrican varias muestras de STF/aramida en diferentes condiciones de mojado y secado. Posteriormente, se estudia el incremento de peso y el aspecto superficial de cada muestra. Las muestras fabricadas se han sometido al impacto controlado de un cuchillo de doble filo que impacta con distinta energía. Los ensayos se realizaron en una torre de caída de peso, obteniendo la evolución temporal de la energía absorbida por el conjunto de “muestra tejido/backing material” durante el ensayo de perforación. Las gráficas “Altura caída-Ancho corte” indican que, manteniendo su densidad areal, no se aprecia mejor rendimiento de la resistencia a penetración de las muestras STF/aramida tratadas. Sin embargo, a igualdad de capas, si mejora el comportamiento de las muestras tratadas a baja energía (baja altura de caída libre). Sin embargo, a medida que se sube de altura, el rendimiento de dos de las muestras empeora, aunque uno sigue manteniendo mejor comportamiento respecto al que ofrece la protección sin STF (pura). Un análisis detallado de la zona de corte y los valores de incremento de peso es llevado a cabo revelando que, el factor temperatura de secado juega un papel muy importante en la resistencia a impacto de cuchillo, el factor tiempo de mojado menos.

Palabras claves: SiO_2 nanoparticles; PEG200; Kevlar textile products; Stab resistance; drying temperature; wetting time

DEDICATORIA

A los Profesores Marcos Rodríguez Millán y José Antonio Loya Lorenzo, tutores de este Trabajo Fin de Grado. Por sus apoyos y correcciones, además de por la forma cercana, pero a la vez docente con la que me han tutelado.

Así mismo, le debo mis agradecimientos al Prof. Dr. D. Juan Baselga Llidó por el consejo hacia la parte experimental del presente trabajo.

Al compañero Yahya Agzenai Ben Salem, por toda la ayuda que me ofreció durante la realización de la primera parte experimental, en particular durante el proceso de dispersión coloidal.

Gracias también, a mis compañeros de trabajo por los consejos que me ofrecieron durante la realización de dicha memoria.

Y una vez más, expreso mi más sincero agradecimiento a todos los profesores y compañeros que me atendieron y ayudaron a lo largo de estos seis meses de trabajo.

CONTENIDO

| | |
|---|------|
| RESUMEN | III |
| DEDICATORIA | V |
| ILUSTRACIONES..... | VIII |
| TABLAS..... | X |
| CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 Motivación | 1 |
| 1.2 Objetivos | 1 |
| 1.3 Metodología | 1 |
| 1.4 Aportaciones originales | 2 |
| 1.5 Estructura del documento | 2 |
| CAPÍTULO 2: ESTADO DE ARTE..... | 4 |
| 2.1 Antecedentes | 4 |
| 2.2 Definición de tejido aramida | 6 |
| 2.2.1 Aplicación del tejido aramida | 8 |
| 2.3 Definición de STF | 8 |
| 2.3.1 Mecanismo de ODT (Order Disorder Transition) | 10 |
| 2.3.2 Por la formación de hydroclusters | 11 |
| 2.3.3 Por el efecto Jamming..... | 11 |
| 2.4 Factores que influyen sobre el comportamiento reológico de STF | 12 |
| 2.4.1 La fracción volumétrica de las partículas..... | 13 |
| 2.4.2 Tamaño de la partícula..... | 14 |
| 2.4.3 Distribución de las partículas de distintos tamaños | 16 |
| 2.4.4 Interacción partícula-partícula..... | 16 |
| 2.4.5 Dureza de la partícula | 17 |
| 2.4.6 Rugosidad de la partícula | 17 |
| 2.4.7 Modificaciones en la partícula | 17 |
| 2.4.8 Medio de dispersión | 19 |
| 2.4.9 Temperatura | 21 |
| CAPÍTULO 3: DESARROLLO EXPERIMENTAL DE LA FABRICACIÓN DE STF/ARAMIDA | 24 |
| 3.1 Materiales y equipos involucrados | 24 |
| 3.1.1 Materiales involucrados | 24 |
| 3.1.2 Máquinas y aparatos empleados | 26 |
| 3.2 Preparación de STF | 27 |
| 3.3 Fabricación del fluido dilatante | 28 |
| 3.3.1 Estado de dispersión de SiO ₂ | 28 |

| | |
|--|--------------|
| 3.3.2 Procedimiento de fabricación..... | 28 |
| 3.3.3 Estado de dispersión de STF..... | 33 |
| 3.4 Obtención de la tela impregnada de STF | 35 |
| 3.5 Resultados | 37 |
| 3.6 Discusión..... | 39 |
| CAPÍTULO 4: REALIZACIÓN DE ENSAYOS DE STF/ARAMIDA FRENTE A ARMA | |
| BLANCA..... | 43 |
| 4.1 Tela bajo torre de caída con cuchilla..... | 43 |
| 4.1.1 Materiales ensayados | 43 |
| 4.1.2 Máquina y mecanismo | 43 |
| 4.1.3 Alturas de caída | 44 |
| 4.1.4 Cuchillo (Engineered Knife Blades) | 45 |
| 4.1.5 Ángulo de incidencia | 45 |
| 4.1.6 Backing material | 46 |
| 4.1.7 Profundidad de penetración | 46 |
| 4.2 Resultados | 47 |
| 4.2.1 Por igualdad de masa | 48 |
| 4.2.2 Por igualdad de capas | 53 |
| 4.3 Discusión de resultados | 56 |
| CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS | 62 |
| 5.1 Conclusiones | 62 |
| 5.2 Trabajos futuros | 63 |
| REFERENCIAS..... | 64 |
| APÉNDICE A | - 1 - |
| APÉNDICE B..... | - 2 - |

ILUSTRACIONES

| | |
|---|----|
| Ilustración 1: Fibras aramida [8]. | 7 |
| Ilustración 2: Nómex® Meta-Aramid Molecular Structure y Kevlar® Para-Aramid Molecular Structure. Fuente imagen de la empresa FIBER-LINE® [45]. | 7 |
| Ilustración 3: Principales características de las fibras aramídicas (valores aproximados). Fuente de la tabla: [8]. | 8 |
| Ilustración 4: Fluidos newtonianos y no newtonianos. Fuente de la imagen [39]. | 9 |
| Ilustración 5: Ecuación constitutiva. El esfuerzo cortante es directamente proporcional al gradiente de velocidad. Siendo η la viscosidad dinámica del fluido. Fuente de la expresión [21]. | 9 |
| Ilustración 6: Dos comportamientos de STF típicos y sus características. En la figura: los parámetros principales para definir el comportamiento espesante de los fluidos son la velocidad de cortadura crítica, la viscosidad crítica y la tensión de cortadura crítica. Los autores del trabajo [46], piensan que se puede usar la diferencia de viscosidad entre la máxima alcanzable y la crítica del fluido para definir la intensidad del STF.... | 10 |
| Ilustración 7: Gráfica ilustrativa de la viscosidad en función de la velocidad o de la tensión de cortadura. Muestra los 3 estados del comportamiento reológico de un fluido dilatante [41]. | 11 |
| Ilustración 8: Esquema contenido del apartado 2.4. | 12 |
| Ilustración 9: Gráfica viscosidad en función de la velocidad de cortadura que muestra 7 curvas SiO ₂ /PEG200 de distinta fracción volumétrica [14]. | 13 |
| Ilustración 10: Gráfica velocidad de deformación a cortadura crítica versus tamaño medio de partículas [6]. | 14 |
| Ilustración 11: Tabla realizado por Barnes que recopila datos experimentales de estudios anteriores [6]. | 16 |
| Ilustración 12: Gráfica viscosidad versus velocidad de deformación a cortadura para sistema de dispersión 44% de volumen (es igual que 67% de peso) con distintos ratios de arcilla A (tamaño de partícula = 9 micrómetros) y arcilla B (tamaño de partícula = 0,7 micrómetros) [6]. | 16 |
| Ilustración 13: Imágenes obtenidas con microscopio electrónico de barrido (SEM, izquierda) y de transmisión (TEM, derecha) de las nano-partículas de sílice antes y después de los tratamientos. a) Partículas sin tratar, b) tratadas mediante molienda de bolas sin EG, c) mediante molienda de bolas con EG y d) mediante método químico con EG [57]. | 18 |
| Ilustración 14: Curvas viscosidad versus velocidad de deformación a cortadura de las nano-partículas de sílice dispersas en PEG 200 a diferentes fracciones de peso máximo. Curva: a) sílices sin tratar a 75wt% de concentración máxima, b) tratadas sin EG y por molienda de bolas a 80wt%, c) tratada con EG por molienda de bolas a 80wt% y d) tratada con EG por método químico a 88wt% [57]. | 18 |
| Ilustración 15: Curvas viscosidad versus velocidad de deformación a cortadura de sistemas STF, 75wt% en SiO ₂ y medios líquidos de diferentes proporciones PEG200:PEG400. De abajo hacia arriba: proporción en peso 50% de cada PEG, PEG200 Y PEG400 1:2, PEG200 Y PEG400 1:3, contenido mayoritariamente de PEG400 [48]. | 20 |
| Ilustración 16: Gráfica tensión crítica (símbolos rellenos) y el producto de la velocidad cortadura crítica y la viscosidad del medio (símbolos no rellenos) versus viscosidad del medio de los 2 sistemas: HS250 y PTM20 [49]. | 21 |
| Ilustración 17: Influencia de la temperatura sobre la viscosidad del PG [58]. | 22 |
| Ilustración 18: Viscosidad versus velocidad de deformación a cortadura del sistema PG/SiO ₂ a diferentes temperaturas [60]. | 22 |

| | |
|--|----|
| Ilustración 19: Viscosidad versus tensión de cortadura del sistema PG/SiO ₂ a diferentes temperaturas [60]. | 23 |
| Ilustración 20: Estructura química de PEG200. Proporcionada por la empresa vendedora SCHARLAB. | 24 |
| Ilustración 21: Estructura química de Etanol. Proporcionada por la empresa vendedora SCHARLAB. | 25 |
| Ilustración 22: Las características de una tela. | 25 |
| Ilustración 23: Micrografías del polvo SiO ₂ . La imagen (a) está bajo incremento de X20; Las imágenes (b), (c) y (d) están bajo incremento de X40. | 28 |
| Ilustración 24: Equipo empleado. | 30 |
| Ilustración 25: Configuraciones del equipo. a) Ultra-Turrax; b) Agitador magnético. | 30 |
| Ilustración 26: Fotografías del compuesto tras el mezclado con una concentración de 19% de SiO ₂ en PEG diluido con alcohol. | 30 |
| Ilustración 27: Fotografía del compuesto en estado parcialmente seco. | 31 |
| Ilustración 28: Mezcla de SiO ₂ +PEG200+Etanol después del mezclado. | 32 |
| Ilustración 29: STF diluido con alcohol etílico. | 33 |
| Ilustración 30: 3 litros de STF diluido con alcohol etílico. | 33 |
| Ilustración 31: Micrografías del STF diluido: a) y b) bajo escala 500 micrómetros; c) bajo escala 200 micrómetros. | 34 |
| Ilustración 32: a) Las siete muestras de Kevlar 204 g/m ² ; b) de izquierda a derecha respectivamente: muestra pura, muestra1, muestra 3 y 5. | 36 |
| Ilustración 33: Mojado de las telas. | 36 |
| Ilustración 34: Secado en el horno con el termómetro dentro. | 37 |
| Ilustración 35: Procedimiento de impregnación: telas Kevlar con fluido dilatante. | 37 |
| Ilustración 36: Estado superficial de: a) Muestra a 50 °C; b) Muestra a 80 °C; c) Muestra a 100 °C. | 39 |
| Ilustración 37: Tela impregnada de partículas sólidas. Dibujo no a escala. Fuente de imagen Nilakantan, G. [40]. | 40 |
| Ilustración 38: Micrografías de: a) Kevlar pura; b) Kevlar/STF a 50 grados Celsius; c) Kevlar/STF a 80 grados Celsius; d) Kevlar/STF a 100 grados Celsius. | 42 |
| Ilustración 39: Izquierda, Torre de caída empleada. Derecha, zoom del Tope inferior de color rojo. | 44 |
| Ilustración 40: Izquierda, dimensiones de la cuchilla y la herramienta de adaptación. Derecha, configuración de la cuchilla en el adaptador. | 45 |
| Ilustración 41: Esquema indicativo del ángulo de incidencia. | 46 |
| Ilustración 42: Boceto de la configuración del backing material. | 46 |
| Ilustración 43: De izquierda a derecha: papel testigo; proyector de perfil; aumento X20 de un corte. | 47 |
| Ilustración 44: Muestra tras el impacto de cuchilla. Por igualdad de masa. | 49 |
| Ilustración 45: Gráfica Energía-Tiempo de la muestra PURA. | 50 |
| Ilustración 46: Gráfica Energía-Tiempo de la muestra M2. | 50 |
| Ilustración 47: Gráfica Energía-Tiempo de la muestra M3. | 51 |
| Ilustración 48: Gráfica Energía-Tiempo de la muestra M6. | 51 |
| Ilustración 49: Gráfica Ancho-Altura. Igualdad de masa. | 52 |
| Ilustración 50: Gráfica Energía máxima-penetración. Igualdad de masa. | 52 |
| Ilustración 51: Muestra tras el impacto de cuchilla. Por igualdad de capas. | 54 |
| Ilustración 52: Gráfica Energía-Tiempo M2_4 CAPAS. | 55 |
| Ilustración 53: Gráfica Energía-Tiempo M3_4 CAPAS. | 55 |
| Ilustración 54: Gráfica Energía-Tiempo M6_4CAPAS. | 56 |
| Ilustración 55: Gráfica Ancho-Altura. Igualdad de capas. | 56 |
| Ilustración 56: Transmisión de energía y fuerza en STF/aramida. [61]. | 59 |

TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1: Características de las capas de tejido de aramida no tratadas y termoplásticas..... | 25 |
| Tabla 2: Sustancias químicas involucradas en el presente trabajo con sus respectivos datos físicos..... | 26 |
| Tabla 3: Máquinas y aparatos involucrados. | 26 |
| Tabla 4: Configuración temporal de las máquinas. | 29 |
| Tabla 5: Configuración final de las máquinas..... | 32 |
| Tabla 6: Plan de fabricación Kevlar/STF..... | 35 |
| Tabla 7: Peso medio de cada tela registrado. Medidas en gramo. | 38 |
| Tabla 8: Por igualdad de peso. | 43 |
| Tabla 9: Condiciones de impacto. Programa ordenador CEAST..... | 45 |
| Tabla 10: Profundidad de penetración y energía máxima. Ensayo por igualdad de masa. Unidad de penetración en [mm] y de energía en [J]. | 48 |
| Tabla 11: Profundidad de penetración y energía máxima. Ensayo por igualdad de masa. Unidades en [mm] y [J]..... | 53 |
| Tabla 12: Incremento de penetración. Por igualdad de masa. | 58 |
| Tabla 13: Incremento de penetración. Por igualdad de capas..... | 59 |

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

La exigencia de la seguridad corporal a nivel mundial es creciente debido a los problemas de delincuencia y terrorismo, y las tradicionales prendas de protección han revelado ciertas carencias, en particular en lo relativo al compromiso entre eficiencia (capacidad para minimizar el efecto producido por un arma) y su ergonomía (combinación de ligereza y flexibilidad). Por este motivo, el tema del desarrollo de nuevos materiales flexibles con mayor nivel de protección contra amenaza, ya sea de arma blanca o arma de fuego, se ha convertido en un tema de gran importancia e interés en el mundo actual.

En los últimos años, las investigaciones en el campo del desarrollo de la protección corporal para el uso militar se centraron mucho en el desarrollo de materiales compuestos. Tales como la combinación de tejido de alto rendimiento (aramida, UHMWPE etc.) con fluidos no newtonianos (STF). Ensayos experimentales demostraron que las propiedades mecánicas de los tejidos tratados, sobre todo, la resistencia ante cargas dinámicas es visiblemente más alta que en los tejidos puros (sin tratar con STF) y sin penalizar especialmente la flexibilidad del tejido, es decir, manteniendo la comodidad de la prenda.

La idea de poder estudiar y fabricar un tejido de alto rendimiento tratado con un fluido no newtoniano y poder determinar la posible mejoría de su comportamiento ante amenaza de cuchillo, ha motivado la realización de este trabajo.

1.2 Objetivos

El objetivo principal del presente trabajo es determinar la posible mejoraría del nivel de protección ante arma blanca de protecciones flexibles de tela de aramida mediante la aplicación de una capa superficial de fluido no newtoniano.

Para la consecución de este objetivo, se han planteado los siguientes objetivos específicos:

- Desarrollar una metodología experimental para la elaboración del STF.
- Analizar el efecto de diferentes variables en la fabricación de tela aramida impregnada de STF.
- Realizar una campaña experimental de ensayos de muestras de STF/ aramida frente a impacto de cuchillo.
- Evaluar el efecto de ciertos parámetros del proceso de fabricación en el nivel de protección alcanzado.

1.3 Metodología

La metodología desarrollada a lo largo del tiempo ha implicado la realización de las siguientes actividades:

1. El estudio de la bibliografía existente relacionada con el tema de telas de alto rendimiento, fluidos no newtonianos, ensayos a impacto de cuchilla y balística, y nuevos materiales compuestos. Consecuencia de este estudio, se realizó una

recopilación de varios trabajos de otros investigadores que han servido de base para el autor del presente trabajo.

2. La elaboración de una metodología experimental para la fabricación de STF, procurando reproducir el proceso llevado a cabo por otros investigadores en estudios de otros años.
3. La búsqueda de los materiales para la fabricación del STF y la impregnación de esto en las telas de aramida.
4. Desarrollo de ensayos en torre de caída.

1.4 Aportaciones originales

Como aportaciones originales de este trabajo, se destaca:

- el análisis de diversos procesos de fabricación de STF descritos en la literatura,
- la realización de un proceso de fabricación de STF de concentración fija adaptado a los medios con los que está dotado el Departamentos,
- la aplicación sobre tejidos de aramida, variando los factores tiempo y temperatura durante las etapas de mojado y secado.
- la realización de una campaña experimental de ensayo ante cuchillo para evaluar la influencia de los anteriores parámetros en la eficiencia de protección.
- el análisis crítico de resultados para determinar y cuantificar dicha mejoría según el caso.

1.5 Estructura del documento

Este trabajo de fin de carrera consta de dos partes básicas. La primera parte es pura teoría, consiste en un resumen de la literatura leída por la autora del trabajo y que ha servido de base para el conocimiento de fluido no newtoniano, sobre todo, el de tipo dilatante, y sus posibles aplicaciones en el sector de las protecciones personales. La segunda parte es experimental, incluye un apartado de selección de materiales químicos y equipos de fabricación, un apartado de la fabricación de STF/aramida, uno de ensayo a impacto, uno de referencias, otro de bibliografías y dos apéndices.

El capítulo 1, es la introducción.

En el capítulo 2 se presenta 4 sub-apartados que contiene, en el primero, los antecedentes existentes en la literatura científica, relativos a la historia de los fluidos no newtonianos, al comportamiento reológico y a la aplicación de STF en tejidos de alto rendimiento. Y se resumen los nuevos avances en el estudio y la fabricación de STF.

En el segundo y en el tercer sub-apartado se definen dos conceptos:

- La aramida y los tipos de aramida existentes en la actualidad.
- El STF con las 3 teorías que pretenden explicar el mecanismo reológico de este

En el cuarto sub-apartado, se describe los efectos que producen los 9 factores principales de trabajo sobre el STF.

El capítulo 3 trata del desarrollo experimental de la fabricación de STF/aramida. Consta de 3 partes:

- La selección previa de materiales y equipos.
- La preparación del fluido dilatante y las telas de aramida.
- La fabricación del STF/aramida.

El capítulo 4 corresponde al desarrollo de ensayos experimentales de STF/aramida frente a carga dinámica. Se ha presentado dos configuraciones:

- Impacto a cuchillo con torre de caída. Por igualdad de masa.
- Impacto a cuchillo con torre de caída. Por igualdad de capas.

Finalmente, en el capítulo 5 se destacan las conclusiones más relevantes extraídas del trabajo realizado, y se proponen ciertos trabajos futuros como posible continuación del mismo.

CAPÍTULO 2: ESTADO DE ARTE

2.1 Antecedentes

En el desarrollo de la producción industrial, se descubrió que el fenómeno de espesamiento por cortadura de los fluidos suele provocar muchos problemas en los procesos industriales tales como la incorrecta aplicación de materiales de recubrimiento, obturación de conductos, deterioro en los equipos de producción etc. [6].

La frecuente aparición de dicho fenómeno en los fluidos llamó la atención de los investigadores y realizaron una serie de estudios para comprender el mecanismo, la composición, las características y los factores que influyen sobre dicho comportamiento, siendo elaborada por R.L. Hoffman (1972) [25] la primera teoría surgida con la intención de explicar el comportamiento reológico de los fluidos.

Con la ayuda de nuevas técnicas y métodos sistemáticos, numerosos estudios fueron realizados posteriormente, corroborando la teoría de Hoffman, aunque también hubo detractores [29]. Los trabajos realizados por John F. Brady (1988) [9], Barnes H A. (1989) [6] y Martin Laun (1991) [29] fueron revisados por el autor de este trabajo fin de grado y se estudiará con más detalle las distintas teorías propuestas en apartados más adelante.

A pesar de los problemas que podían traer esta característica tan peculiar de espesamiento a cortadura, ésta se convirtió en una ventaja interesante en algunas aplicaciones. Así, a principios del siglo XXI, se utilizó para desarrollar ropas de protección flexibles, equipos de amortiguación de esquí, poleas del cigüeñal, limitador de velocidad, amortiguadores, equipos de control etc. [37] [31].

El polvo de sílice es el aditivo más empleado en fluidos espesante por cortadura, debido a su buena estabilidad química y ventaja económica. Por este motivo, se está incrementando los esfuerzos en investigar las propiedades espesantes por cortadura de los sistemas de dispersión compuestos por partículas de sílice y los factores que los influyen para las aplicaciones reales [31], [48], [58], [56], [60].

En la actualidad, es también foco de estudio el uso de mezcla de varios tipos de sólidos como elementos dispersantes en el fluido. Para poder fabricar materiales compuestos con mejores rendimientos aprovechando las propiedades físicas y químicas que poseen cada material.

La investigadora Sha Xiao Fei [48] en su tesis, estudió el mecanismo y las propiedades reológicas de distintos fluidos dilatantes con el fin de encontrar un material flexible destinado a la protección corporal de las personas usando tejidos clásicos de alto rendimiento (Kevlar) reforzados con fluido dilatante. El principal enfoque de su trabajo se centró en el efecto que produce los 3 factores: temperatura, tipo de partículas de dispersión y tipo de medio de dispersión sobre la viscosidad del fluido dilatante. Escogió distintos ratios de PEG200, PEG400 (4:1,3:1,2:1, 1:1, 1:2, 1:3,1:4) y combinaba con las partículas de suspensión. Mediante los análisis de los experimentos reológicos realizados pudo concluir que, para sistemas de STF compuesto por medios de dispersión de ratio diferente, la viscosidad del conjunto dilatante incrementa si se aumenta el peso molecular del medio de dispersión, y el fenómeno de espesamiento puede ocurrir a menor velocidad de cortadura [[48], cap. 3]. A parte de tal combinación clásica (mezcla de PEG con SiO_2), Fei investigó también el comportamiento reológico

de los STF compuesto por nanotubos de Carbono o por grafeno, realizando una comparativa de estos 3 tipos de STF.

Además, mencionó por primera vez el mecanismo de espesamiento de un fluido dilatante en situación de multi-fase, es decir, combinar los 3 tipos de aditivos en un mismo medio inerte. Estos nuevos fluidos proporcionan una oportunidad para obtener sistemas compuestos multi-funcional que permiten afinar las propiedades reológicas con respecto al campo de aplicación.

Los resultados experimentales muestran que para STF de multi-fase, si se añade una cantidad adecuada de grafeno al sistema de STF compuesto por nanotubos de carbono, puede mejorar el mecanismo reológico del conjunto, obteniéndose efectos espesantes relativamente óptimos.

Por otra parte, estudió el cambio que produjo en el mecanismo reológico del sistema STF clásico (PEG + SiO₂) y del sistema STF multi-fase debido a distintas temperaturas. Concluye que, si se incrementa la temperatura del ambiente la viscosidad del sistema disminuye, y el efecto espesante se debilita.

Recientemente, investigadores como G. Selim *et al.* [20] publicaron sus estudios sobre fluidos dilatantes multifásicos. Analizaron el efecto que producen los factores temperatura, fracción volumétrica, el tamaño de las partículas, la distribución etc., sobre las propiedades reológicas del STF, pero el principal enfoque de su trabajo es sobre la reología de STF multi-fase.

A diferencia de Sha Xiao Fei, G. Selim *et al.*, en sus trabajos emplean varios materiales más. Aparte de nano-partículas de carbono y nano-plaques de grafeno, existe también estudios que usan partículas cerámicas [20] y [21], fluidos magnetoreológicos (MR) [52], [43] y halloysite nanotubes (con un diámetro de 30 a 70 nm y longitud de 1 a 3 micrómetros) [4] y [49] citado en [20] como elementos de dispersión.

El comportamiento reológico de los STF multifásicos es más complejo. El papel que juega los factores como la cantidad de aditivos y el tamaño de las partículas es mucho más relevante. Pueden atenuar el fenómeno de espesamiento a cortadura, aumentar la densidad e incrementa la viscosidad inicial del fluido.

Una adición excesiva de partículas cerámicas puede interrumpir completamente el comportamiento espesante de la suspensión de dos maneras. La primera es debida a que la adición decrece el porcentaje de partículas de SiO₂. La segunda es por el acortamiento de la red de hydroclusters en la suspensión debido a partículas aditivas intersticiales. Aunque esto mejora fuertemente la viscosidad del STF incluso a baja velocidad de cortadura. Según Selim *et al.*, para concentración de partículas superior al 25 wt% en STF (compuesto por 20 wt% de SiO₂), se puede observar un evidente aumento de viscosidad a baja velocidad de cortadura, y la aparición del comportamiento de adelgazamiento por cortadura.

Por otra parte, se observa que partículas cerámicas gruesas decrecen la viscosidad y la ratio de espesamiento del STF. Aunque la velocidad a cortadura y el periodo de espesamiento no se ven modificados.

Xiong Fang *et al.* [61], hicieron una comparativa de tela de Kevlar pura con otras tratadas con STF (SiO₂ + PEG200) de distinta concentración en sílice, y bajo un ensayo de caída libre con cuchillo.

A nivel macroscópico, los resultados que obtuvieron muestran que las telas reforzadas se comportan mejor ante amenaza de cuchillo que las telas sin reforzar, y a medida que se va incrementando la concentración en masa de SiO_2 , la resistencia ante impacto se mejora progresivamente.

A nivel microscópico, la cantidad de fibras que interviene en la acción de resistencia ante amenaza en tela reforzada con STF es mayor que en tela pura. Esto implica que, la distribución de fuerzas de impacto es mejor en la tela con STF, debido a la acción de las partículas de SiO_2 que se habían quedado impregnadas en la superficie de la tela y en los huecos existentes entre las fibras.

2.2 Definición de tejido aramida

La palabra aramida viene del inglés “aromatic polyamide”. Es una fibra orgánica y sintetizada (tiene alto grado de cristalinidad). Es altamente resistente térmica y mecánicamente por estar compuesta de cadenas de macromoléculas alineadas y rigidizadas mediante anillos aromáticos con uniones de hidrógeno [38], [[8], pág. 44-46], [[5], pág. 26-29].

Dependiendo del proceso de obtención (hilado húmedo o seco) se puede clasificar dos tipos de aramidas:

- LAS METAS-ARAMIDAS (hilado seco): Nómex
- LAS PARA-ARAMIDAS (hilado húmedo): Kevlar, Twaron

Dentro de las para-aramidas marca Kevlar existen 3 tipos principales: Kevlar RI, Kevlar 29 y Kevlar 49. Descubiertas en 1965 por Stephanie Kwolek y desarrolladas por la compañía Du Pont. Se empezaron a comercializar desde los años 70 (Kevlar 29 y 49 son los más comerciales). Junto con el Nylon (1940), se formaban las 2 fibras sintéticas más importantes de esa época.

Entre las características principales de Kevlar se destacan:

- Alta resistencia específica a la tracción (Kevlar es 5 veces más resistente que el acero)
 - Excelente resistencia al impacto, alta capacidad de absorción de energía
 - Densidad menor que todas las fibras sintéticas utilizadas en laminados
 - Resistente a la corrosión (excepto en caso de ácidos muy fuertes)
 - Alto módulo de elasticidad
 - Resistencias a las llamas y auto extingible
 - Elevada resistencia térmica
 - Baja elongación a la rotura
 - Rotura progresiva
- Etc.



Ilustración 1: Fibras aramida [8].

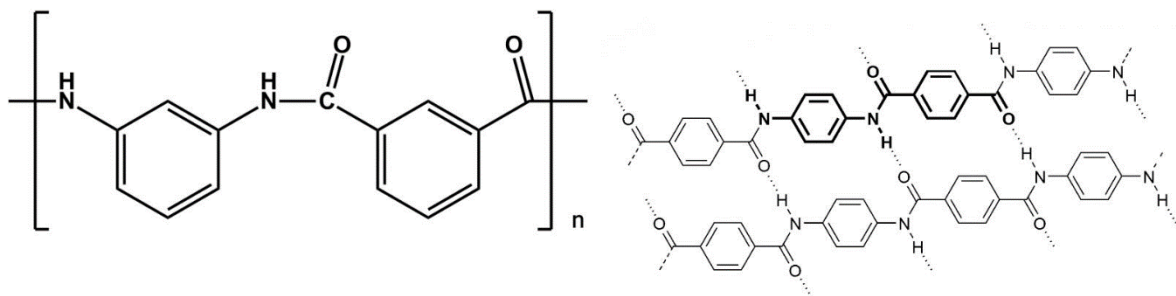


Ilustración 2: Nómex® Meta-Aramid Molecular Structure y Kevlar® Para-Aramid Molecular Structure. Fuente imagen de la empresa FIBER-LINE® [45].

| <i>Tipo</i> | <i>Normal (kevlar®29)</i> | <i>HM (kevlar®49)</i> |
|--|---------------------------|-----------------------|
| <i>Resistencia a la tracción (GPa)</i> | <i>2,8 – 3,0</i> | <i>2,8 – 3,4</i> |
| <i>Módulo elástico (GPa)</i> | <i>58 - 80</i> | <i>120 - 186</i> |
| <i>Densidad (Kg/m³)</i> | <i>1390 - 1440</i> | <i>1450 - 1470</i> |
| <i>Alargamiento a la rotura (%)</i> | <i>3,3 – 4,4</i> | <i>1,9 – 2,4</i> |
| <i>Resistencia específica (GPa * cm³/g)</i> | <i>1,9 – 2,2</i> | <i>1,9 – 2,3</i> |
| <i>Módulo E específico (GPa * cm³/g)</i> | <i>40 - 56</i> | <i>83 - 127</i> |
| <i>Chef. Transmisión térmica (10⁶/°K)</i> | <i>-2,0 a -6,0</i> | <i>-2,0 a -6,0</i> |
| <i>Diámetro del filamento (µm)</i> | <i>12</i> | <i>12</i> |

Ilustración 3: Principales características de las fibras aramídicas (valores aproximados). Fuente de la tabla: [8].

2.2.1 Aplicación del tejido aramida

Es muy general que Kevlar se comercialice en forma de tejido, la razón es porque las fibras de Kevlar tejidas otorgan resistencia en más de una dirección.

La aplicación de Kevlar en la industria es en general:

El Kevlar RI:

- Para el refuerzo de neumáticos

El Kevlar 29:

- Para paracaídas
- Cuerdas
- Cables

El Kevlar 49 es la preferida para los materiales compuestos de elevadas prestaciones.

Tradicionalmente, para lograr mejores resultados en la protección corporal se fabrican prendas acoplando varias capas de telas Kevlar.

Permite incrementar la resistencia ante las amenazas balísticas, pero incrementa también pesos innecesarios del conjunto e incomodidad. Obstruye de cierto modo el movimiento corporal, y estéticamente no es muy ideal.

Hoy en día se busca mejorar los chalecos de protección teniendo en cuenta el peso total, la resistencia, la flexibilidad y los costos de fabricación.

2.3 Definición de STF

STF, acrónimo de Shear Thickening Fluid, es un tipo de “fluido dilatante”. Más genéricamente, es un sistema de dispersión que consiste en la combinación de un medio de dispersión y unas partículas de dispersión. Pertenece a la familia de Fluidos

no Newtonianos independientes del tiempo (a la que pertenecen también los pseudoplásticos y los de Bingham).

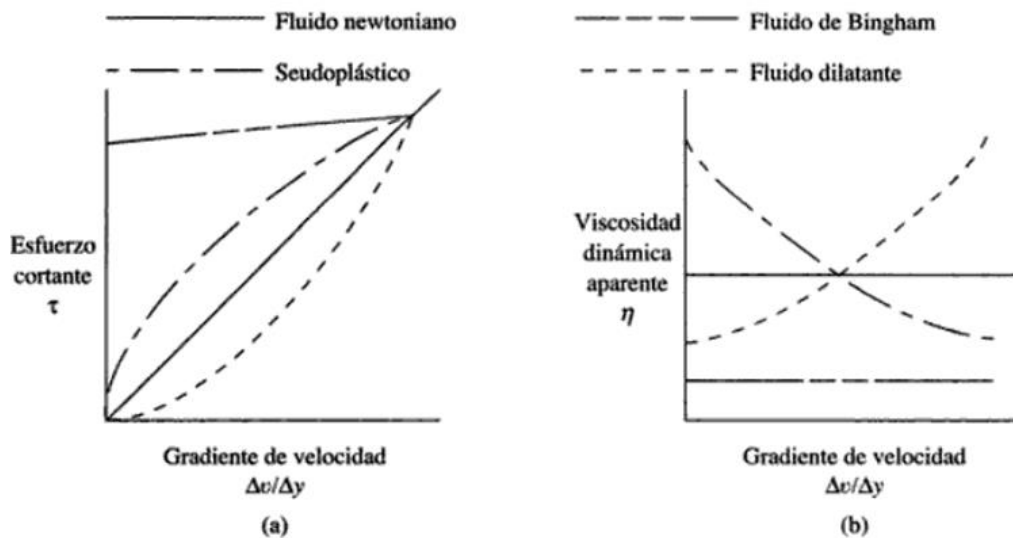


Ilustración 4: Fluidos newtonianos y no newtonianos. Fuente de la imagen [39].

Son aquellos fluidos cuyo esfuerzo cortante no es directamente proporcional a la rapidez de deformación como pueden ser los compuestos acuosos con concentración alta de sólidos. Su principal diferencia con los fluidos newtonianos es el incumplimiento de la siguiente ecuación [39], [42]:

$$\tau = \eta(\Delta v/\Delta y)$$

Ilustración 5: Ecuación constitutiva. El esfuerzo cortante es directamente proporcional al gradiente de velocidad. Siendo η la viscosidad dinámica del fluido. Fuente de la expresión [21].

En estado libre de cargas o bajo cargas pequeñas tiene una buena fluidez. Sin embargo, para cargas superiores a la crítica [25], aparece el fenómeno de espesamiento a cortadura. La viscosidad aparente sufre grandes alteraciones, pasándose incluso de estado líquido al estado sólido.

Existen principalmente dos clases de STF:

- Sistemas coloidales que usan nano-partículas como elementos de dispersión. Por ejemplo: dióxido de silicio, nano carbonato de calcio etc.
- La segunda son sistemas de suspensión formados por partículas sub-micrónicas como: sílice sub-micrónica, PMMA o almidón tamaño micrón como elementos de dispersión.

Ambas clases de STF presentan diferencias destacadas, la primera normalmente, presenta espesamiento por cortadura continua [31] y [37], [13] citados en [46]. Sin embargo, la segunda presenta comportamiento espesante a cortadura de forma discontinua cuando está bajo estado de muy alta concentración [13], [27], [45] citados en [46].

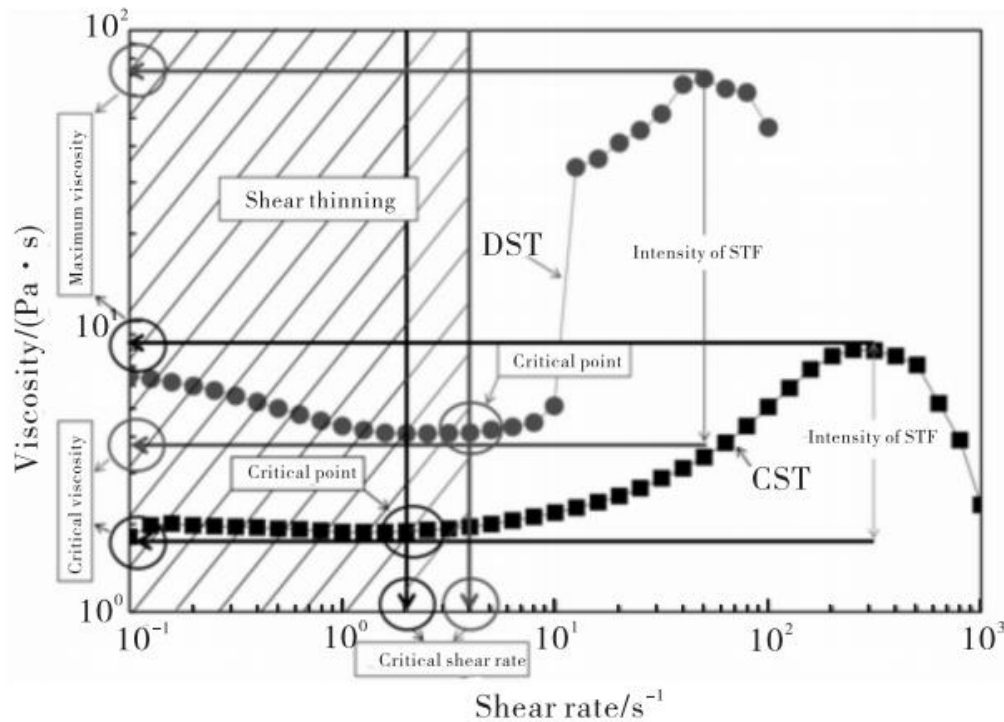


Ilustración 6: Dos comportamientos de STF típicos y sus características. En la figura: los parámetros principales para definir el comportamiento espesante de los fluidos son la velocidad de cortadura crítica, la viscosidad crítica y la tensión de cortadura crítica. Los autores del trabajo [46], piensan que se puede usar la diferencia de viscosidad entre la máxima alcanzable y la crítica del fluido para definir la intensidad del STF.

Este comportamiento de espesamiento debido a cortadura es particular de los materiales de clase Fluidos no Newtonianos, y es un cambio reversible [24] citado en [46], es decir, una vez que la fuerza es retirada, el fluido vuelve rápidamente a su estado inicial.

No se trata de un tipo de fluido nuevo. Este fenómeno de espesamiento de la suspensión coloidal llamó la atención de la gente hace años, debido a la obstrucción de las tuberías de conducción, el deterioro de las maquinarias etc. [20]. Desde los años 80, los investigadores comenzaron el estudio de cómo podría aprovechar este comportamiento de los STF para implementarlo en el área de la protección contra impactos.

Existen tres teorías que pretenden explicar el mecanismo reológico del STF.

2.3.1 Mecanismo de ODT (Order Disorder Transition)

La primera es mencionada por Hoffman [25] (en los años 1972, 1974): Mecanismo de ODT (Order Disorder Transition), revela que las partículas en suspensión se ordenan y se desplazan en “capas”, cuyo espesor puede variar entre el valor del diámetro de las partículas y el múltiplo del diámetro medio de las partículas. Explica que el fenómeno de shear thinning durante la primera fase del comportamiento del fluido es debido a que el nivel de ordenamiento de las partículas de la suspensión se ha incrementado. Y que el fenómeno de shear thickening en la posterior fase (para cargas superiores a la de límite) es causado por la interrupción de la estructura ordenada de las partículas. Es decir, el equilibrio del sistema es interrumpido por las fuerzas hidrodinámicas, las partículas

fugan de sus capas ordenadas y atascan a las otras, incrementando de esta manera la viscosidad del sistema.

Durante los años 80 y 90, Martin Laun *et al.* [29] usaron la técnica de emerging small-angle neutrón-scattering (SANS) para demostrar que la teoría de transición de estado ordenado a desordenado expuesta por Hoffman no era suficiente para explicar el comportamiento espesante por cortadura de los STF ni es necesaria cumplir la condición de ordenamiento de la estructura para que ocurriese el fenómeno. Porque se trata de un comportamiento en estado de alta disipación energética y muy desequilibrado.

2.3.2 Por la formación de hydroclusters

La segunda teoría propone que la formación de hydroclusters es la causa principal. Brady y otros [9], realizaron simulaciones al comportamiento espesante a cortadura de los fluidos mediante la construcción de modelos dinámicos Stokesianos. Las investigaciones demuestran que en estado de equilibrio, la dispersión coloidal se resiste a fluir por la naturaleza de las colisiones arbitrarias entre partículas. Y cuando sufre cargas de cortadura bajas, las partículas se tienden a organizar ordenadamente según la dirección del flujo, y de esta manera, la viscosidad de la dispersión decrece (Adelgazamiento por cortadura o shear thinning). Para cargas más elevadas, las interacciones hidrodinámicas entre partículas se convierten en el factor dominante del incremento de la viscosidad (Espesamiento por cortadura o shear thickening) porque conducen a la formación de hydroclusters que dificultan el movimiento del fluido.

La teoría del hydroclusters consiste en que las partículas bajo la fuerza de cortadura se agrupan venciendo la fuerza de repulsión entre partículas, formándose “nubes” concentradas de partículas, y así, la viscosidad del sistema de dispersión se incrementa como puede apreciar en la siguiente ilustración.

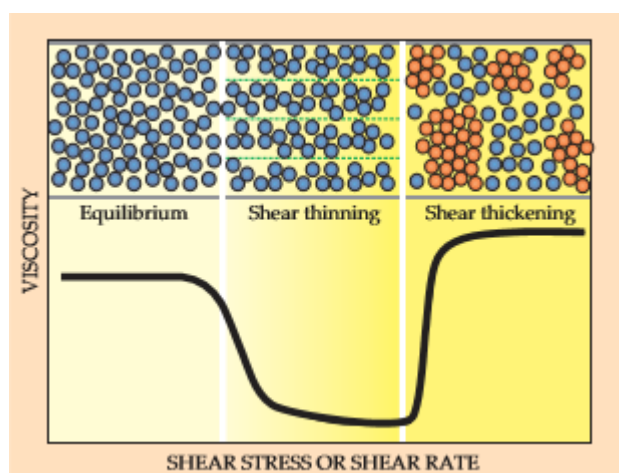


Ilustración 7: Gráfica ilustrativa de la viscosidad en función de la velocidad o de la tensión de cortadura. Muestra los 3 estados del comportamiento reológico de un fluido dilatante [41].

2.3.3 Por el efecto Jamming

La teoría más reciente expone el efecto Jamming [15], [47], [16] y [46], como explicación al comportamiento de espesamiento a cortadura discontinua de los sistemas tales como

el almidón en medio acuoso. En ella, debido al efecto de las elevadas cargas en el fluido, las “nubes” de partículas entran en contacto y rozan entre sí dentro de un espacio limitado, dando lugar al fenómeno *jamming* (atascamiento) que aumenta bruscamente la resistencia a fluir del sistema.

Farr *et al.* [15] mediante simulaciones, pudieron observar el fenómeno *jamming* por la concentración de hydroclusters en el sistema. Posteriormente, estudios de Fernández *et al.* [16] y Seto *et al.* [47] verificaron esta teoría debido a que los resultados de sus simulaciones los llevan a las mismas conclusiones.

Las tres teorías son correctas para contestar al mecanismo reológico de un STF. Es más, la teoría ODT no entra en conflicto con la teoría de hydroclusters porque se puede razonar que el estado desordenado de la primera teoría es el mismo que el clusters. Y que la teoría *jamming* se puede considerar una expansión de la segunda teoría. Para sistemas de alta concentración, conforme se incrementa la velocidad de cortadura se forma más clusters en el sistema que ocupan un espacio limitado. Estos clusters nacen y crecen impidiendo el movimiento de los otros. A nivel macroscópico, es un fenómeno de espesamiento a cortadura no continuo.

2.4 Factores que influyen sobre el comportamiento reológico de STF

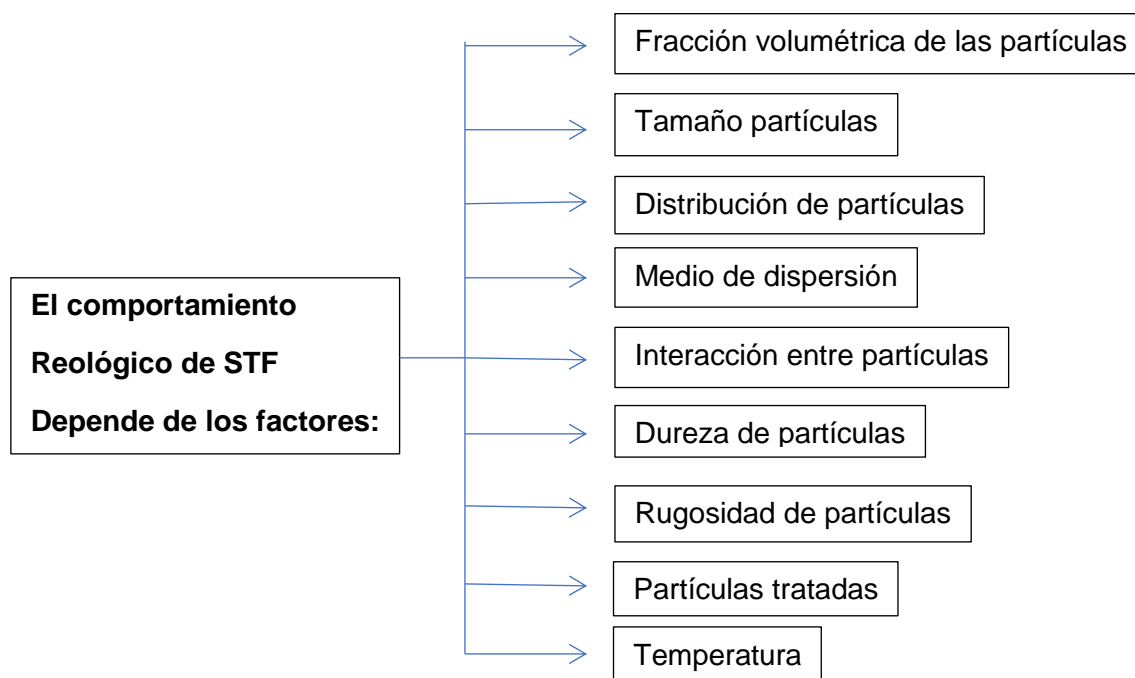


Ilustración 8: Esquema contenido del apartado 2.4.

Existen múltiples factores que pueden influir sobre el comportamiento reológico del STF. Dependiendo del tipo de suspensión (SiO_2 esférica/PEG, CaCO_3 elipsoidal/PEG, PMMA, monofásico, polifásico...), muchas veces los distintos factores estudiados para un caso no funcionan de la misma manera para otro, es posible la aparición de efectos adversos fuera de lo previsto.

Por lo tanto, para el foco de estudio de este trabajo, se centrará sobre todo a la literatura que trata de analizar los principales factores (el tamaño de las partículas, la forma en que se distribuyen, la viscosidad del medio de dispersión o la temperatura del sistema ya que son consideradas las causas principales [[20], cap., 3].) que pueden dominar el comportamiento de un STF compuesto por partículas de SiO_2 y PEG. Que es el tipo de fluido dilatante utilizado con más frecuencia en las investigaciones.

2.4.1 La fracción volumétrica de las partículas

Es la relación entre el volumen de las partículas y el volumen total del sistema (la concentración de partículas en el sistema). El efecto de este factor sobre el comportamiento reológico de STF es importante.

Cuando la fracción volumétrica crece la velocidad de deformación a cortadura crítica disminuye y las fuerzas hidrodinámicas aumentan, debido a que la distancia intermolecular se reduce y de esta forma, se requiere menos velocidad de deformación a cortadura la para vencer la fuerza de repulsión entre partículas e iniciar el tramo de aumento de la viscosidad del sistema [19], [54].

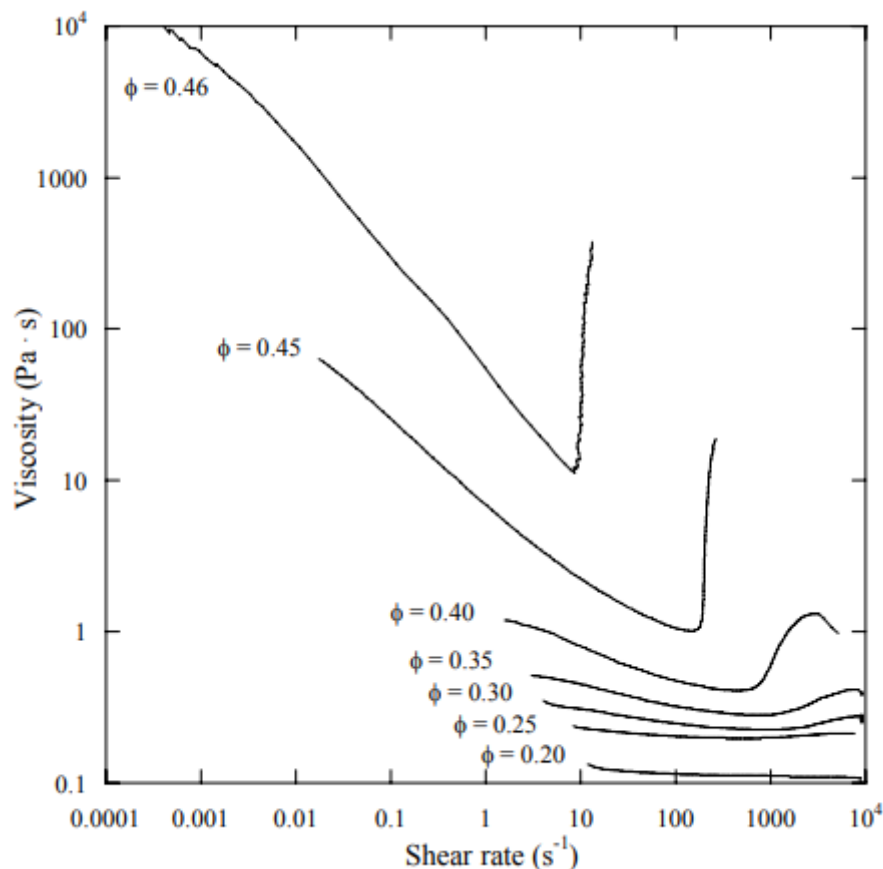


Ilustración 9: Gráfica viscosidad en función de la velocidad de cortadura que muestra 7 curvas $\text{SiO}_2/\text{PEG200}$ de distinta fracción volumétrica [14].

Además, la ratio de espesamiento se ve incrementada y el período de espesamiento se reduce.

En consecuencia, fluidos dilatante con alta carga de partícula implica aumentos en la viscosidad porque restringe el movimiento de la partícula en la suspensión.

2.4.2 Tamaño de la partícula

Existe múltiples estudios analíticos y experimentales que pretenden demostrar la importancia del factor tamaño de las partículas sobre el comportamiento defensivo de tejidos impregnados de sistemas de suspensión coloidal [25], [37] y [30].

Bok Won Lee y sus compañeros [30] hicieron unas comparaciones entre muestras de telas reforzadas con STF de diferente tamaño de partículas de sílices (100nm, 300nm y 500nm), demostraron que el efecto del tamaño de las partículas es, en efecto, uno de los factores más importantes para alcanzar mejoras en el rendimiento balístico.

Descubrieron que el aumento de la energía de extracción de un hilo de la tela impregnada con STF era inversamente proporcional al tamaño de la partícula. Muestras de telas reforzadas con STF de partículas pequeñas (100nm de sílices) bajo ensayo balístico muestran incrementos dramáticos de fricción entre hilos de la tela que contribuye a incrementar la capacidad de disipación de la energía de extracción de los hilos.

Barnes [6] anunció que velocidad de deformación a cortadura crítica para el comienzo del fenómeno de espesamiento se relaciona con la inversa del cuadrado del radio de la partícula. Conclusión extraída de una recopilación de datos experimentales dentro de la literatura.

Número de Inercia de Chaffey:

$$\frac{\rho a^2 \dot{\gamma}}{\eta} \quad (i.e., \dot{\gamma} \propto \frac{\eta}{a^2})$$

Donde a es el radio de la partícula.

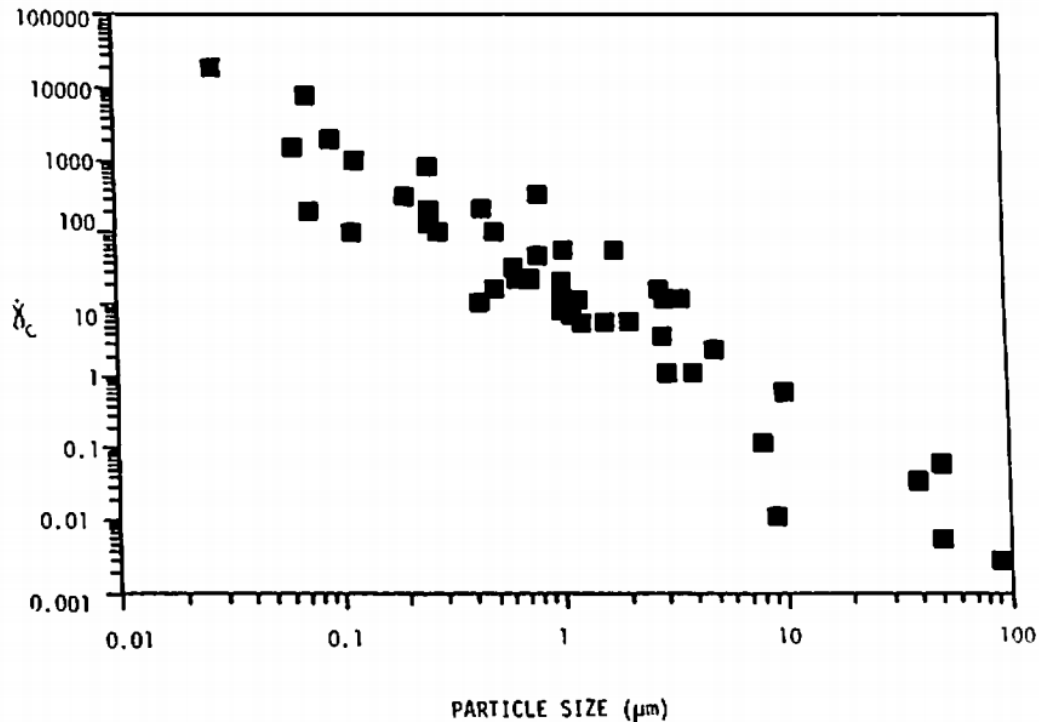


Ilustración 10: Gráfica velocidad de deformación a cortadura crítica versus tamaño medio de partículas [6].

TABLE I
Compilation of Particle Size vs. Critical Shear Rate Data

| Author(s) | System | Particle size (μm) | Approximate critical shear rate (s^{-1}) |
|------------------------------|---|---------------------------------|---|
| Albert (27) | Clay in water | 0.5 | ~ 15 |
| Alince & Lepoutre (25) | Calcium carbonate in water | 0.7 | $\sim 300\text{--}1000$ |
| Beasley (21) | Clay in water | 0.25 | 120 |
| Berezov et al. (82) | PVC in water | 1.0 | 10 |
| Bullivant & Jones (84) | Clay in water | 0.25 | $125 \rightarrow 200$ |
| Butters & Roberts (8) | PVC in water | 0.8 | 300 |
| Cawthra et al. (31) | PVC | 4 | 1 |
| Chien et al. (86) | Blood cells in plasma | 9 | 0.1 |
| Choi (57) | Polystyrene spheres in silicon oils | 0.422 | (44cP, 10) (91cP, 1.5) (170cP, 0.75) (446cP, 15) |
| Clarke (35) | Quartz in water | 152–211 | < 10 |
| Eastwood & Barnes (53) | Starch particles in glycerol/water | 10 | 1–20 |
| Forquet (87) | PVC | 3–4 | 10 |
| Freundlich & Röder (39) | Quartz powder in water | 1–5 | 10 |
| Gillespie (88) | PVC in DOP | 1 | 50 |
| Gunnerson & Gallagher (32) | Vinyl vesins in DOP | ~ 1 | $1 \rightarrow 20$ |
| Hoffman (54) | PVC in DOP | 1.25 | 5 |
| | PSAN in ethylene glycol | 0.442 | 200 |
| | PVC in dioctyl phthalate | 1.25 | 5 |
| | PVC in 18–14000 cP | 1.24 | 0.02–27 |
| | Starch/glycerol | 16–60 | 52% 0.03, 56% 0.02 |
| | PVC | 0.608 | 4 in glyc. 20 in DOC |
| | Glass beads in glycerol | 45–65 | 0.05 |
| Kaltwasser et al. (18) | PVC in DOP | 80–100 | 0.0025 |
| Lazor (10) | Typical plastisols | 0.8 | 30–50 |
| Moore & Davies (89) | Alumina casting slip | 1 | 15 |
| | | few μm but < 5 | ~ 10 |
| Morgan (90) | Red iron oxide pigment in water | 0.2 ± 0.1 | ~ 300 by extrap. |
| Patzöld (61) | Glass beads | 50 | $\sim 5 \times 10^{-3}$ |
| Price & Hagemeyer (26) | Carbonate | $\sim 1.1\text{--}1.2$ | 5–7 |
| Schmid-Schönbein et al. (55) | Blood cells in plasma | 8 | 0.1 |
| Severs & Austin (51) | Vinyl chloride resin | ~ 1 | 5–10 |
| Shtakman et al. (91) | PVC in DOP | 0.7 | 20 |
| Strivens (58) | PMMA | 1 | $\sim 500 ?$ |
| Taylor et al. (43) | Polystyrene latex in water | 9.2 | $< 10^{-2}$ |
| Todd (11) | Vinyl paste | 2 | 5 |
| Underdal et al. (28) | Resins in DOP | Mixtures | |
| Van Wazer (45) | Shale & limestone in water | $\sim \frac{1}{2}$ | 100 |
| Verwey & de Boer (46) | Iron particles in CCl_4 | 3 | ~ 1 |
| Wagstaff & Chaffey (29) | M M homopolymer or copolymer with ethyl acetate | 0.027 | 2×10^4 |
| | | 0.0618 | 1.5×10^3 |
| | | 0.111 | 10^2 |
| | | 0.266 | 10^2 |
| | | 1.016 | 20 |
| | | 0.0715 | 200 |
| | | 0.116 | 10^3 |
| | | 0.286 | 10^2 |
| | | 0.091 | 2×10^3 |
| | | 0.251 | 800 |
| | | 0.071 | 8×10^3 |
| | | 0.0618 | 15×10^3 |
| Wiley & Macosko (56, 60) | PVC in DOP | 0.619 | 25 |
| | | 1.2 | 9 |
| Williams et al. (92) | PS in DOP, BBP, & DOA | 2.88 | 12 |
| | | 1.75 | 50 |
| | | 1.55 | 5 |
| | | 2.87 | < 5 |
| Williamson & Heckert (22) | Cornstarch in various solvents | 10.3 | ~ 0.5 |

Ilustración 11: Tabla realizado por Barnes que recopila datos experimentales de estudios anteriores [6].

Estudios realizados por Maranzano y Wagner [37] afirmaron esta relación y proporcionaron otra que relaciona la tensión crítica con la inversa del cuadrado del tamaño de la partícula.

Dicho de otra forma, el efecto del tamaño de partículas de suspensión sobre el sistema demuestra que, para tamaño de partícula más grande el punto crítico de espesamiento se desplaza hacia velocidad de deformación a cortadura más baja, es decir la velocidad de deformación a cortadura crítica disminuye. Y para partículas más pequeñas la densidad aumenta mejorando la viscosidad de la mezcla [19].

2.4.3 Distribución de las partículas de distintos tamaños

El efecto que produce este factor sobre STF también es destacable.

De acuerdo con Barnes [6], el efecto de ajustar la ratio de la distribución de distintos tamaños de las partículas es incluso, de cierto modo, mayor que realizar modificaciones en el tamaño de las partículas.

Si en la mezcla la mayoría de la cantidad total son partículas gruesas, la viscosidad disminuye bruscamente en función de la velocidad de cortadura. Sin embargo, si en la mezcla el contenido de partículas gruesas es igual que partículas finas (50/50), la viscosidad del sistema tiende a permanecer estable.

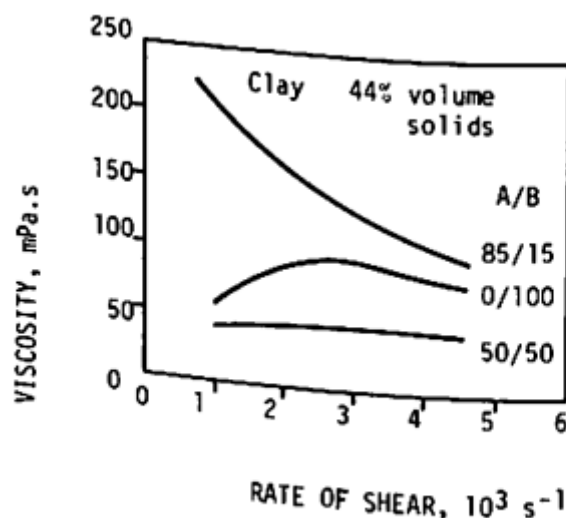


Ilustración 12: Gráfica viscosidad versus velocidad de deformación a cortadura para sistema de dispersión 44% de volumen (es igual que 67% de peso) con distintos ratios de arcilla A (tamaño de partícula = 9 micrómetros) y arcilla B (tamaño de partícula = 0,7 micrómetros) [6].

2.4.4 Interacción partícula-partícula

La interacción entre partículas juega un importante papel en el comportamiento reológico de las suspensiones. Para el fenómeno de espesamiento por cortadura, las

partículas pueden permanecer en estado neutro o repelan uno al otro debido a interacciones entrópicas o estéricas.

Suspensiones defloculadas muestran baja viscosidad para bajas velocidades de deformación a cortadura. Por el contrario, suspensiones floculadas tienen alta viscosidad a baja velocidad de cortadura.

2.4.5 Dureza de la partícula

La influencia de la dureza de la partícula sobre el comportamiento reológico del fluido es destacable.

Para las partículas blandas, la deformación mecánica es predominante, conduce a la disminución de la viscosidad a altas tensiones.

Y las partículas duras son más probables de resistir las tensiones inter-particulares según Gürgeç [19].

Estudio microscópico realizado por Kalman *et al.* [11] en ensayo de impacto cuasi-estático demuestra que el fluido dilatante basado en partículas duras de sílice daña a las fibras del tejido Kevlar. En cambio, los rastros de abrasión en las fibras debidas al elemento impregnadas no son evidentes para el caso de partículas blandas PMMA. Por ello, la dureza de las partículas SiO_2 mayor que PMMA y mayor que el tejido Kevlar.

Además, los datos reológicos registrados para el sistema PMMA/PEG200 se puede reflejar mediante una curva viscosidad versus velocidad de deformación a cortadura que posee una etapa inicial de adelgazamiento, a partir de un cierto punto crítico, la viscosidad del sistema incrementa hasta alcanzar un punto máximo y después aparece un segundo tramo de decrecimiento de viscosidad a altas velocidades, que es diferente a la curva reológica de un sistema SiO_2 /PEG200.

Esto indica que el sistema PMMA/PEG200 no resiste a impactos a altas velocidades y aunque sí tiene resistencia suficiente como para amenazas a bajas velocidades.

2.4.6 Rugosidad de la partícula

Según los estudios realizados, las partículas más ásperas mejoran la viscosidad de la mezcla porque aumentan los puntos de contacto entre partículas.

2.4.7 Modificaciones en la partícula

Yu *et al.* [57], [[19], p.10] realizaron modificaciones superficiales a nano partículas de sílice (cambios en la morfología y en el tamaño de las partículas) dispersas en PEG200 mediante dos métodos. Uno moliendo las bolas de partículas, Y el otro, mediante el método químico. Con o sin la adición de EG (Glycereth) como agente modificador.

Con los resultados obtenidos de los experimentos, pudieron estudiar cambios en la curva de flujo de las suspensiones por el efecto de la modificación. Las partículas tratadas superficialmente con cualquier de los dos métodos, el componente principal (Si - O) no se ve modificado. Aunque sí se produce cambios en los grupos hidroxilos de las nano-partículas debido al agente modificador EG introducido.

Debido a los tratamientos superficiales, la suspensión exhibe mejor dispersibilidad que la suspensión no tratada. Ya que el fenómeno de aglomeración se ve reducido debido a la debilitación de las fuerzas de Van der Waals existentes entre partículas.

La disminución de aglomeraciones permite incrementar la concentración total de partículas sólidas en la dispersión. Y la consecuencia es que el punto crítico de espesamiento por cortadura se desplaza hacia velocidades más bajas.

Con el objetivo de mejorar aún más la dispersibilidad, Hwang *et al.* [26] usa el método MWNT (Nanotubos de pared múltiple, procede del inglés multi – walled nanotube) [34]. El resultado fue que la velocidad cortadura crítica se disminuyó y la viscosidad se mejoró.

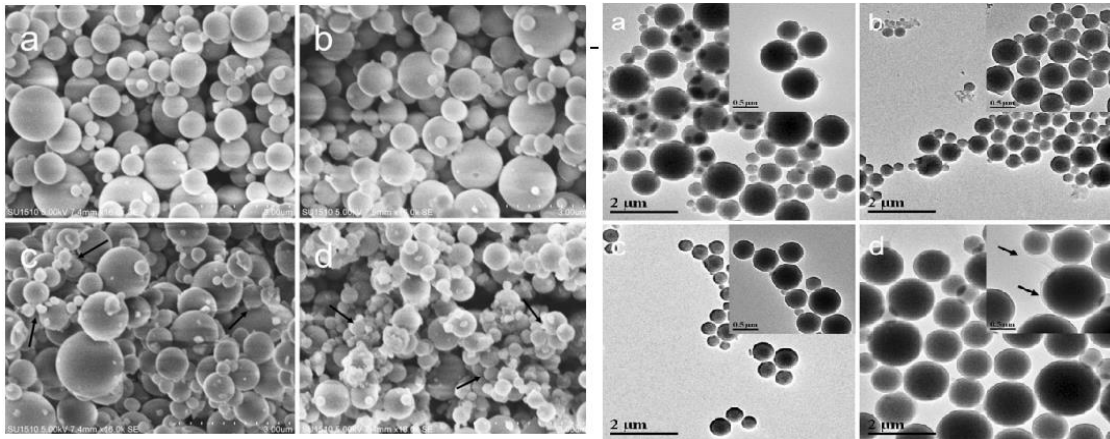


Ilustración 13: Imágenes obtenidas con microscopio electrónico de barrido (SEM, izquierda) y de transmisión (TEM, derecha) de las nano-partículas de sílice antes y después de los tratamientos. a) Partículas sin tratar, b) tratadas mediante molienda de bolas sin EG, c) mediante molienda de bolas con EG y d) mediante método químico con EG [57].

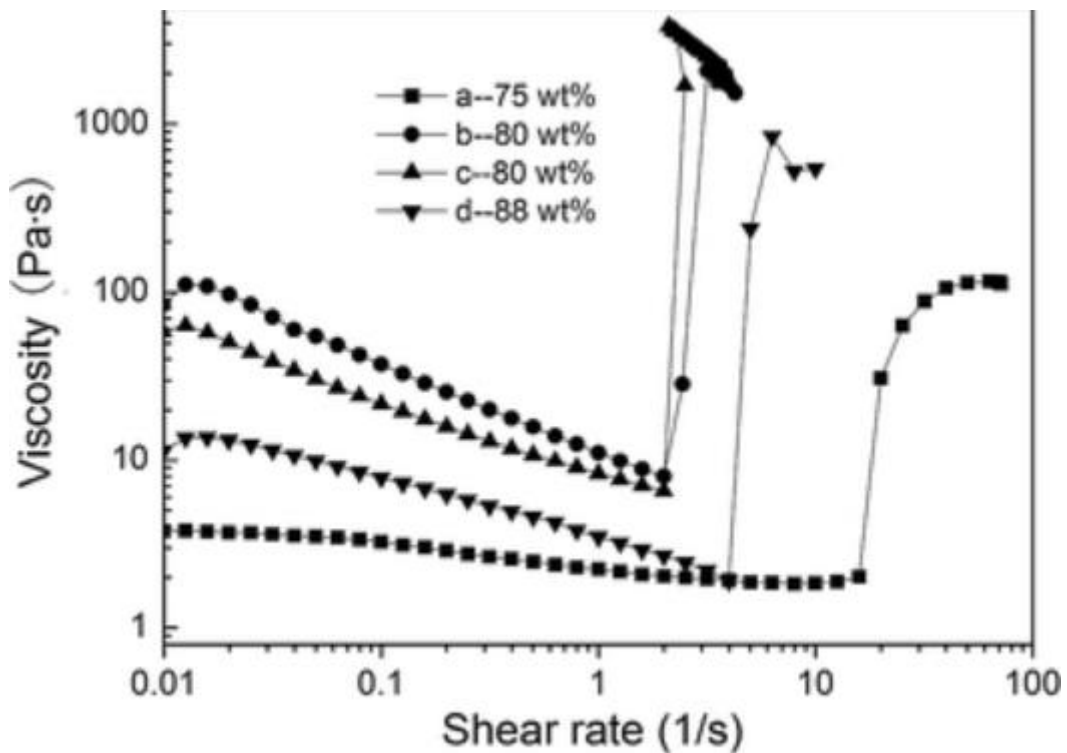


Ilustración 14: Curvas viscosidad versus velocidad de deformación a cortadura de las nano-partículas de sílice dispersas en PEG 200 a diferentes fracciones de peso máximo. Curva: a)

sílices sin tratar a 75wt% de concentración máxima, b) tratadas sin EG y por molienda de bolas a 80wt%, c) tratada con EG por molienda de bolas a 80wt% y d) tratada con EG por método químico a 88wt% [57].

2.4.8 Medio de dispersión

En diversos estudios se observó la importancia del efecto de las propiedades físicas y químicas del medio líquido sobre el comportamiento reológico de los STF [58], [60], [48], [49].

Para resultados obtenidos, comparando STF compuestos por medios líquidos de distintos pesos moleculares, pero de la misma concentración de partículas, se observa que, la velocidad crítica a cortadura del sistema disminuye, la viscosidad inicial y la máxima alcanzable aumentan y el efecto espesante se vuelve más evidente en medios líquidos de mayor peso molecular. Debido a que la longitud de las cadenas moleculares del medio líquido aumenta por el incremento del peso molecular, el espacio entre las moléculas se reduce y así, el contenido de hidroxilos en el medio líquido disminuye provocando que las fuerzas de repulsión Inter-particular se reduzcan. De esta manera, se requiere menos esfuerzos para la formación de hidroclusters e implica la aparición del fenómeno espesante a velocidad de deformación a cortadura menores [5].

Por el otro lado, trabajos experimentales realizados por Shenoy y Wagner [49] demostraron que, si la interacción potencial permanece constante, la tensión crítica es básicamente independiente de la fracción volumétrica de la partícula y de la viscosidad del medio. De la misma forma, se llegaron a que el producto de la velocidad de deformación a cortadura y la viscosidad del medio no cambia con la viscosidad del medio, de acuerdo con lo propuesto por Hoffman en 1974 [23].

Sin embargo, el efecto adelgazante del sistema no tiene una relación evidente con la viscosidad del medio dispersante, depende principalmente de las características químicas de la sustancia [60].

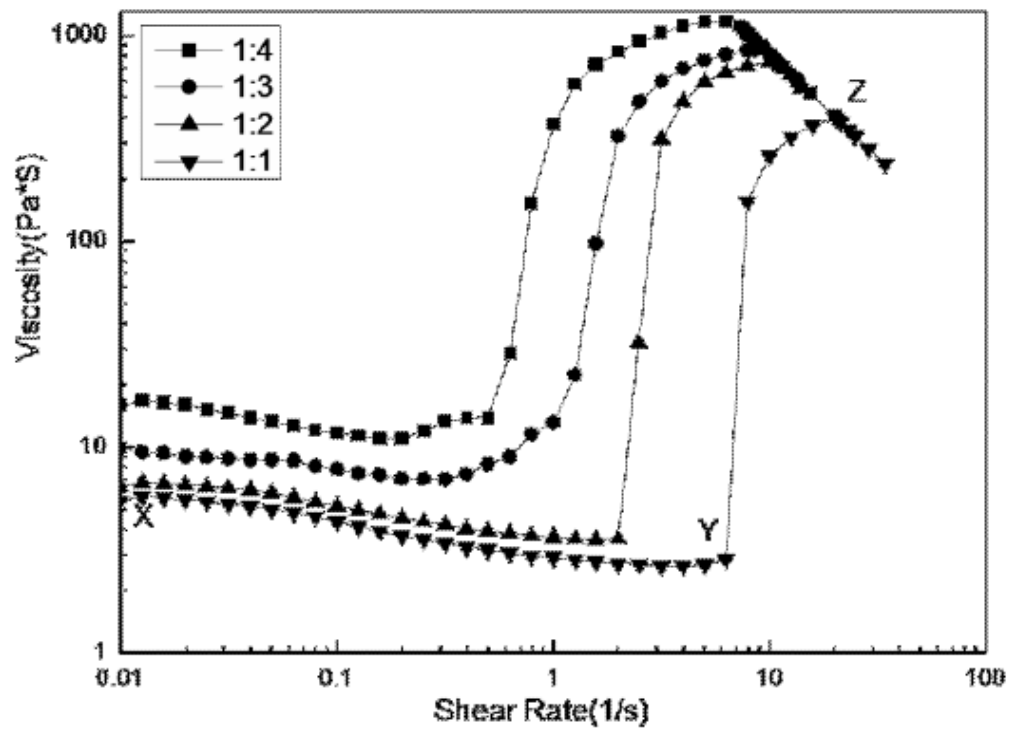


Ilustración 15: Curvas viscosidad versus velocidad de deformación a cortadura de sistemas STF, 75wt% en SiO₂ y medios líquidos de diferentes proporciones PEG200:PEG400. De abajo hacia arriba: proporción en peso 50% de cada PEG, PEG200 Y PEG400 1:2, PEG200 Y PEG400 1:3, contenido mayoritariamente de PEG400 [48].

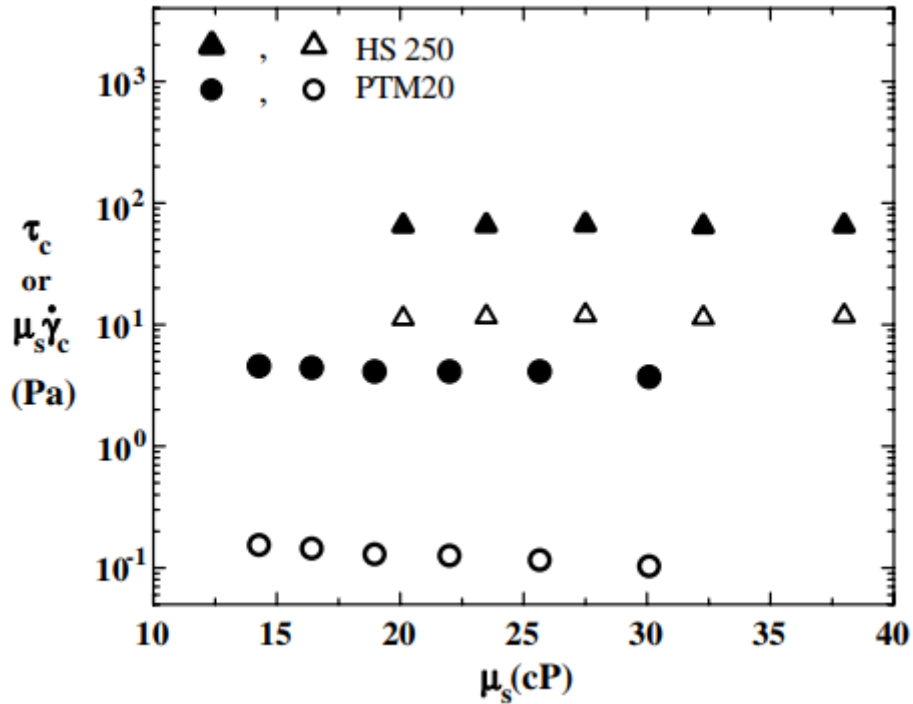


Ilustración 16: Gráfica tensión crítica (símbolos rellenos) y el producto de la velocidad cortadura crítica y la viscosidad del medio (símbolos no rellenos) versus viscosidad del medio de los 2 sistemas: HS250 y PTM20 [49].

2.4.9 Temperatura

La influencia de la temperatura sobre el comportamiento del sistema de dispersión se debe a que afecta a la viscosidad del medio de dispersión [6].

Wu Qiu Mei *et al.* (2006) [58] analizaron que según la temperatura incrementa, la viscosidad del medio dispersante PG (Propilenglicol) disminuye, afectando a la curva que representa el comportamiento reológico del sistema PG/SiO₂, desplazándola verticalmente hacia abajo.

Estudios realizados por Shan Lei *et al.* (2015) [60] obtuvieron las mismas observaciones. Además, se demuestran que la tensión de cortadura crítica casi no varía, aunque la velocidad de deformación a cortadura crítica si se ve incrementada por el aumento de la temperatura.

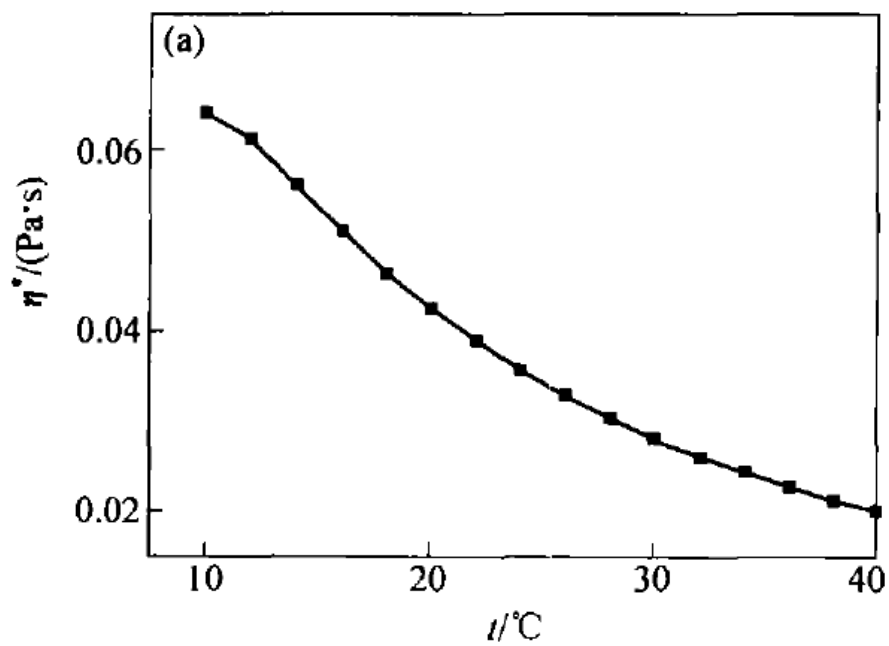


Ilustración 17: Influencia de la temperatura sobre la viscosidad del PG [58].

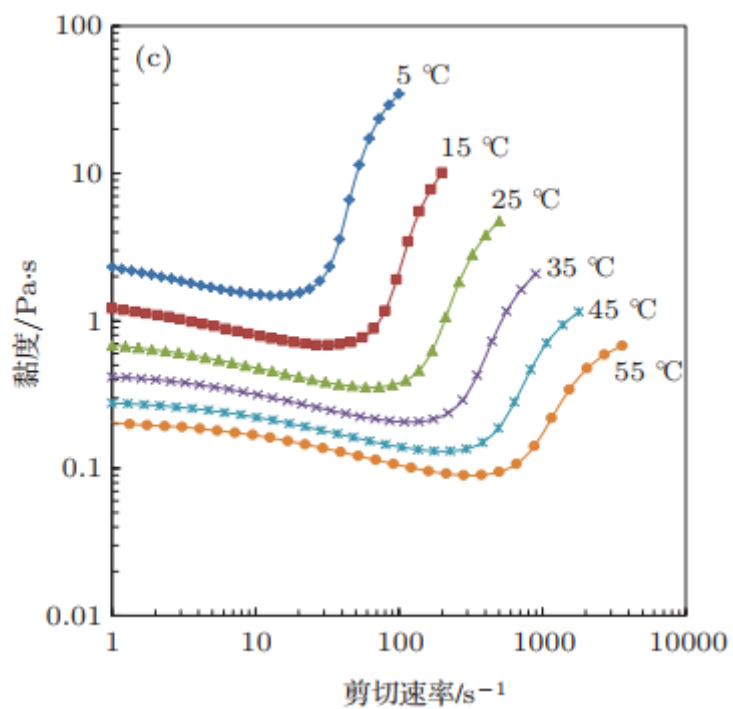


Ilustración 18: Viscosidad versus velocidad de deformación a cortadura del sistema PG/SiO₂ a diferentes temperaturas [60].

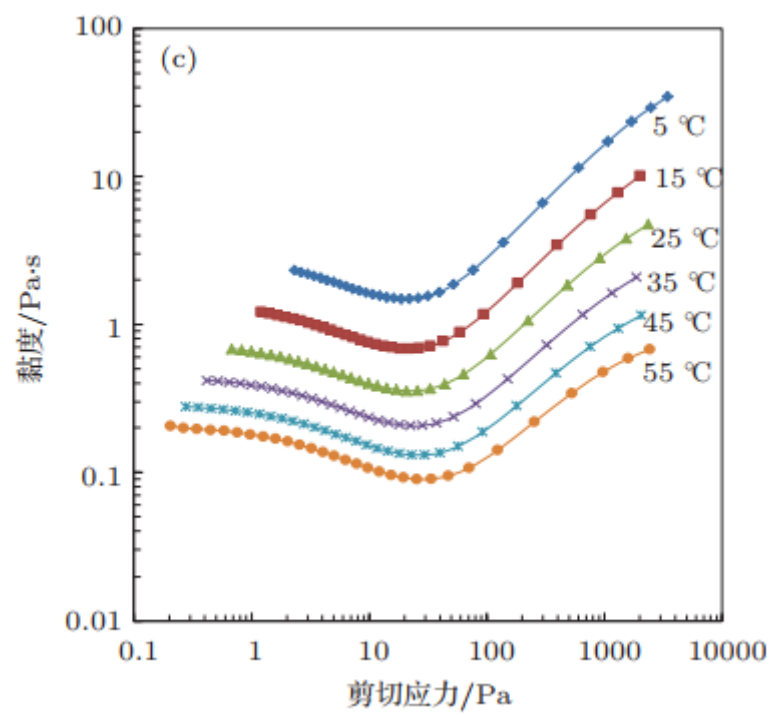


Ilustración 19: Viscosidad versus tensión de cortadura del sistema PG/SiO₂ a diferentes temperaturas [60].

CAPÍTULO 3: DESARROLLO EXPERIMENTAL DE LA FABRICACIÓN DE STF/ARAMIDA

3.1 Materiales y equipos involucrados

3.1.1 Materiales involucrados

En el presente trabajo se fabrica el sistema coloidal empleando principalmente polietilenglicol (PEG200) como medio disolvente y partículas de SiO_2 como elemento de suspensión.

La elección de PEG es debido a que, generalmente en los estudios experimentales, se pretende buscar un medio disolvente que tenga las siguientes propiedades:

- No tóxicas.
- Poseer una estabilidad química lo suficiente como para evitar las incertidumbres.
- Tener una viscosidad adecuada para sostener las partículas en su interior evitando precipitaciones innecesarias.
- Activo en un amplio rango de temperaturas.
- Fácil de conseguir en el mercado y ser económico.

Por el otro lado, la decisión de usar partículas de SiO_2 es porque se trata de unas partículas:

- No tóxicas.
- Químicamente estables.
- Homogéneas.
- Baratas.
- Morfología más regular.

Para diluir las mezclas es preferible usar líquidos que se evaporan a temperaturas medias-altas, no tóxicas e inertes. Por ello, en este estudio se ha empleado el alcohol etílico.

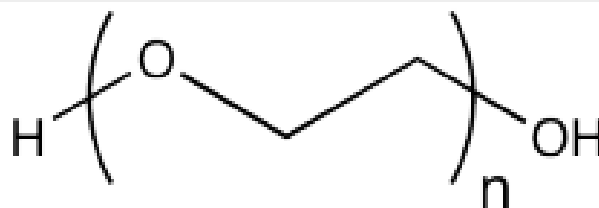


Ilustración 20: Estructura química de PEG200. Proporcionada por la empresa vendedora SCHARLAB.

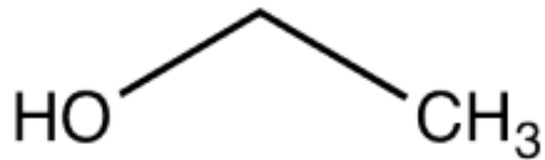


Ilustración 21: Estructura química de Etanol. Proporcionada por la empresa vendedora SCHARLAB.

El tipo de aramida empleado es el Kevlar densidad superficial 204 g/m². Se caracteriza por tener:

- Alta resistencia a la tracción y módulo de elasticidad
- Buena resistencia a fatiga y a impacto
- Baja densidad

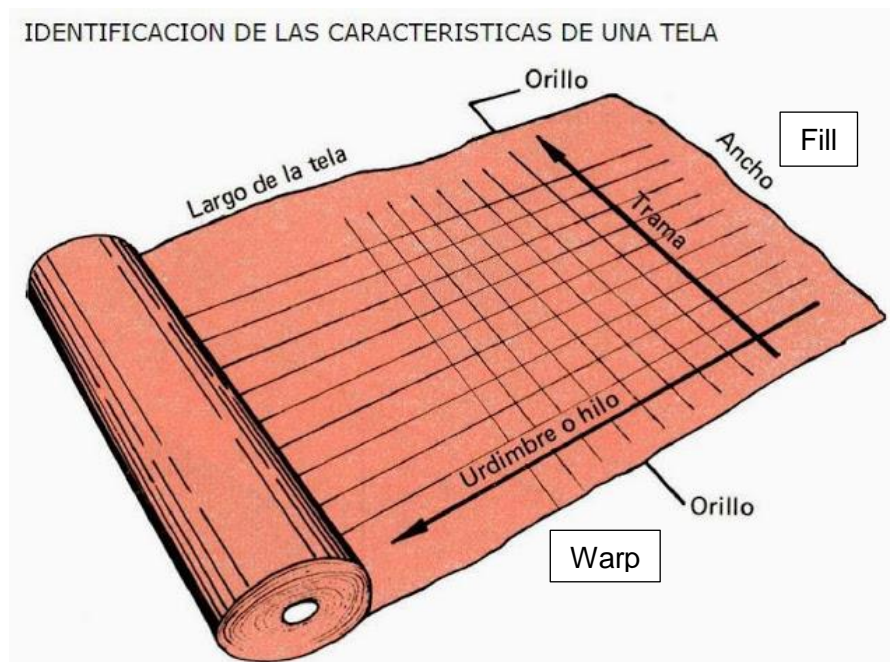


Ilustración 22: Las características de una tela.

| Tela | densidad areal (g/mm ²) | dirección | ancho sección (mm) | espesor sección (mm) | Área (mm ²) |
|------|-------------------------------------|-----------|--------------------|----------------------|-------------------------|
| 802 | 204 | fill | 1,142 | 0,175 | 0,065 |
| 802 | 204 | warp | 1,095 | 0,175 | 0,069 |

Tabla 1: Características de las capas de tejido de aramida no tratadas y termoplásticas.

| Siglas | Nombre | Densidad aparente (g/ml) | Área superficial específica (m ² /g) | Punto de fusión/ebullición (°C) |
|------------------|------------------------------------|--------------------------|---|---------------------------------|
| SiO ₂ | Nanopartículas de Óxido de silicio | - | 200±25 | 1726/- |
| PEG200 | Polietilenglicol | 1,124 | - | -55/250 |
| Etanol | Alcohol etílico | 0,79 | - | -114,5/78,3 |

Tabla 2: Sustancias químicas involucradas en el presente trabajo con sus respectivos datos físicos.

3.1.2 Máquinas y aparatos empleados

| Nombre del aparato | Unidad | El modelo y la serie | Datos técnicos | Marca |
|--|--------|--------------------------|--|--------------------------------|
| Báscula digital 1 | 1 | SNAW 1000 A1 | MAX 5 Kg d = 1 g | SilverCrest |
| Báscula digital 2 | 1 | EMB5.2K1 | MAX 5200 g d = 1 g | KERN |
| Baño de ultrasonido | 1 | Modelo: 3.5 RS | 22 kHz | ULTRASONIC CLEANING TECHNOLOGY |
| Horno | 1 | URBAN-H150AX | 2.67 kW 230 V / 50/60 Hz 11.61 A | Edesa |
| Agitador magnético | 1 | Isotemp™ Basic Hotplates | 50 - 60 Hz | Fisherbrand |
| Ultra-Turrax | 1 | Controller magicLAB | 50/60 Hz | IKA |
| Microscopio de Fluorescencia/ invertido/con cámara digital | 1 | GX71 | Resolución espacial: 0,1 | OLYMPUS |
| Microscopio Biocular | 1 | SW10X-H/25 | | Euromex |
| Máquina de Impacto por Caída Libre | 1 | CEAST 9350 | energía desde 0.59 J hasta 757 J (0.44 a 558 ft-lb) | INSTRON |
| Proyector de perfil | 1 | V-20 A | ±0.1% en iluminación de contorno, ±0.15% en iluminación de superficie | Nikon |
| Termómetro 1 | 1 | alcohol | - | - |
| Termómetro 2 | 1 | Tira bimetálica | 60-120 °C | - |

Tabla 3: Máquinas y aparatos involucrados.

3.2 Preparación de STF

El número de muestras que se necesita para el presente trabajo es dependiente del número de ensayos que se va a realizar y del número de condiciones de trabajo.

El interés del autor es estudiar el efecto que existe los factores tiempo y temperatura sobre Kevlar tratada con STF. Se ha planteado 3 condiciones diferentes de fabricación de STF/aramida (Tabla 6) y dos configuraciones de ensayo. Por tanto, se requiere 6 muestras de STF/aramida y 2 muestras puras para operaciones de calibración y de prueba. Resultando al final 8 muestras de telas.

Para la adquisición de los materiales químicos, se ha tomado como referencia el trabajo realizado por Xiong Fan *et al.* [6] y se ha intentado reproducir el procedimiento de fabricación de un STF con 40 % en peso de SiO₂.

El cálculo seguido es el siguiente:

Si se dispone de tela Kevlar de 240 g/m², el peso total de 90 telas es: 216 gramos. La cantidad de partículas de sílices que se va a necesitar depende de los gramos de PEG200, siendo la relación de 40 % en peso de SiO₂:

$$\text{wt \%} = \frac{(X \text{ g SiO}_2)}{X \text{ g SiO}_2 + Y \text{ g PEG200}} \quad (1)$$

Y la densidad de PEG200 = 1124 g/L.

La relación volumétrica entre etanol (alcohol etílico) y STF (PEG200+SiO₂) es: **3:1** (en este caso, ha considerado que la relación másica es también 3:1)

Según los resultados experimentales obtenidos por Xiong Fan *et al.* [6]:

- para tela Kevlar que pesa 400 g/m²
- STF de 40 wt% en SiO₂
- Y muestra compuesta por 10 capas de tela

Es capaz de absorber una cantidad media de 8,57 gramos de STF.

De tal forma, aplicando la ecuación (1), se obtiene que una muestra de 10 capas es capaz de absorber 3,428 gramos de SiO₂.

Aunque para este proyecto se ha decidido emplear Kevlar de menor peso (204 g/m²) y es intuitivo que la capacidad de absorción de una tela más densa es mayor que otra de menor densidad. Sin embargo, se ha decidido emplear este número como dato de partida para la adquisición del número de botes de materiales químicos.

Aplicando el valor de 3,428 g a nuestro caso, 8 muestras de 10 capas se requiere 27,424 gramos de SiO₂; Para una concentración de 40 % en peso de partículas se requiere 41,136 gramos de PEG200 (equivale a 0,0366 litro de PEG200) y 205,68 gramos de etanol (equivale a 0,253 litros de etanol).

Se observa que la cantidad estimada de STF absorbida por las 80 telas es escasa, para una mayor comodidad de aplicación multiplicamos por 10 estas cantidades.

Con lo cual, se requiere aproximadamente:

- 315 gramos de SiO₂

- 0,50 litros de PEG200
- 3,5 litros de Etanol

3.3 Fabricación del fluido dilatante

3.3.1 Estado de dispersión de SiO₂

En primer lugar, se ha estudiado la micrografía del producto SiO₂ usando el microscopio. Se puede observar que estas partículas sólidas muestran una buena dispersión en seco, la morfología es prácticamente esférica y el tamaño es más o menos uniforme según cómo muestran en la Ilustración 23 (c) y (d). La aparición de aglomeraciones del polvo en seco bajo el microscopio en aumento de X 40 no es muy destacada.

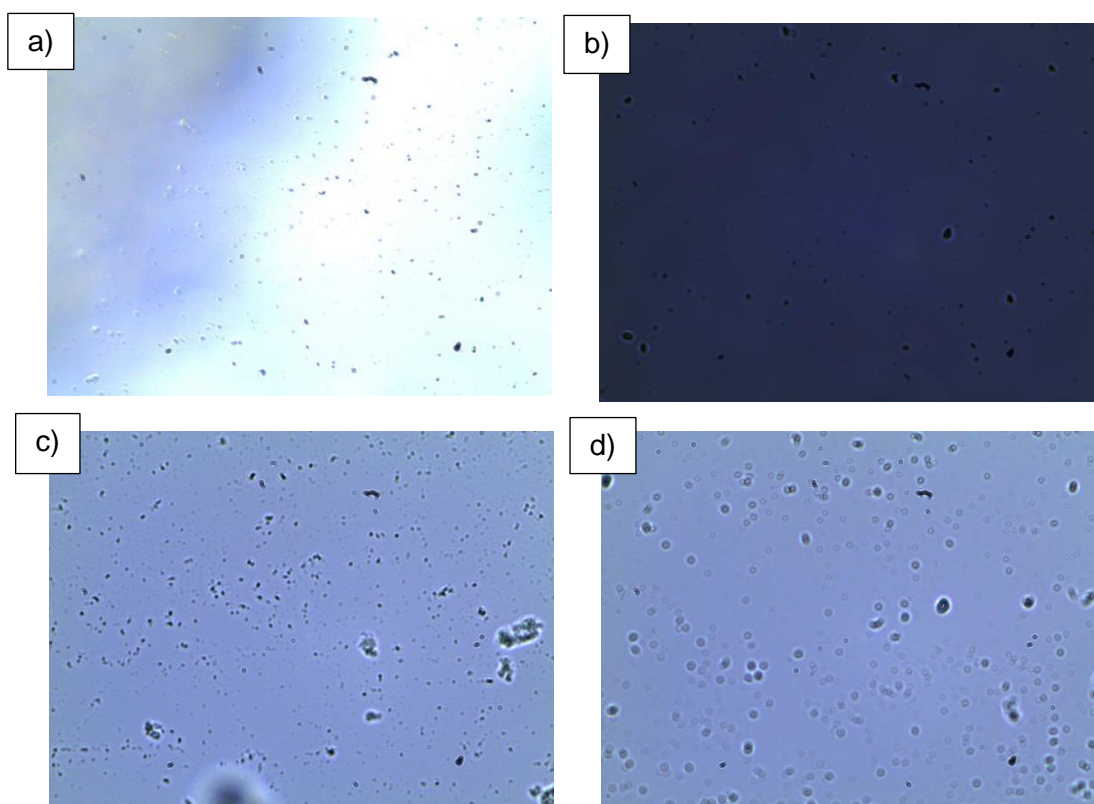


Ilustración 23: Ilustración 23: Micrografías del polvo SiO₂. La imagen (a) está bajo incremento de X20; Las imágenes (b), (c) y (d) están bajo incremento de X40.

3.3.2 Procedimiento de fabricación

Para empezar, se pesaban 315 gramos de nano partículas de sílice en la báscula eléctrica. Y se medían 0,5 litros de PEG200 mezclados con 1 litros de etanol. Ambos líquidos depositados en el baño de ultrasonidos.

Con el aparato encendido a máxima frecuencia y a temperatura ambiental, se echaba poco a poco el polvo de sílice removiendo constantemente con una varilla para facilitar el mezclado.

Sin embargo, no se pudo echar mucha cantidad de SiO_2 porque la mezcla presentaba un estado de saturación que no permitía añadir más partículas.

Por lo que adicionalmente se echó otros 0,25 litros de PEG200 y 0,5 litros de Etanol más en el baño, pero no mejoraba mucho la situación y quedaba al final una cantidad de 121 gramos de Sílice sin mezclar. El producto final poseía una textura gelatinosa no líquida y de color blanco.

El baño de ultrasonidos no era lo suficientemente potente para producir una mezcla homogénea. Para el compuesto de partículas sólidas en suspensión que se quiere fabricar, el método de ultrasonidos se vio que no era muy eficiente debido a que el compuesto era bastante viscoso y también porque se quería fabricar cantidades más grandes que la capacidad máxima permisible del equipo.

Por tanto, se recurrió al uso de una combinación de varias máquinas como puede apreciar en la Ilustración 24. Por debajo se colocaba el agitador magnético y encima se montaba el Ultra-Turrax (un tipo de mezcladora especializado para homogeneizar suspensiones coloidales). El tiempo de agitación configurado era al principio 3 horas y se vio que sí daba buenos resultados.

Las condiciones de mezclado, velocidad de agitación y temperatura de trabajo de las máquinas eran las mostradas en la Tabla 4. Los valores eran intermedios porque se buscaba una mezcla más regulada y sin que dañe a las propiedades de las sustancias. A muy altas revoluciones de la Ultra-Turrax puede afectar al tamaño de las partículas sólidas suspendidas.

| | Velocidad (rpm) | Temperatura (°C) |
|---------------------------|-----------------|------------------|
| ULTRA-TURRAX | 6000 | 200 |
| AGITADOR MAGNÉTICO | 500 | 100 |

Tabla 4: Configuración temporal de las máquinas.

La textura del compuesto antes de someterse a la agitación con las máquinas Ultra-Turrax/Agitador magnético era gelatinosa y seca, igual que la muestra mostrada en la Ilustración 27. Sin embargo, 1 hora después de la agitación, el compuesto empezó a licuarse y progresivamente la mezcla era más homogénea y poco viscosa. El resultado es mostrado en la Ilustración 26 a) y b).

Aplicando ecuación (1), se obtiene que la concentración de SiO_2 en el compuesto $\text{SiO}_2/\text{PEG200}$ era en ese momento $\approx 20\%$ en peso.



Ilustración 24: Equipo empleado.

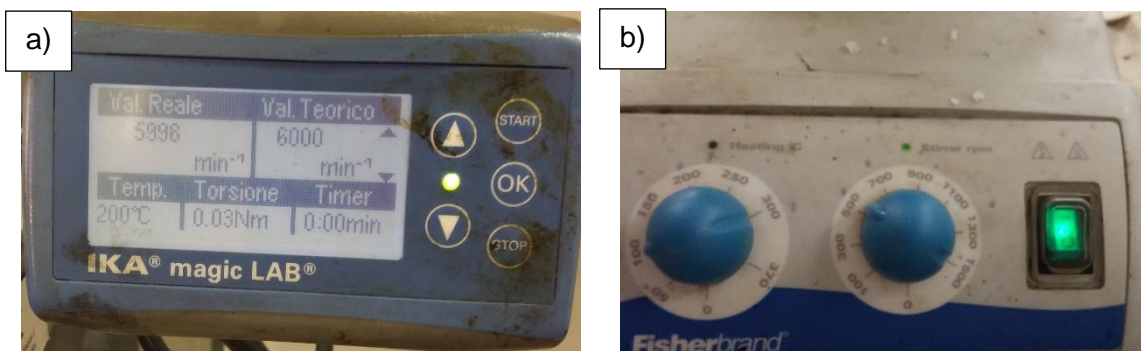


Ilustración 25: Configuraciones del equipo. a) Ultra-Turrax; b) Agitador magnético.

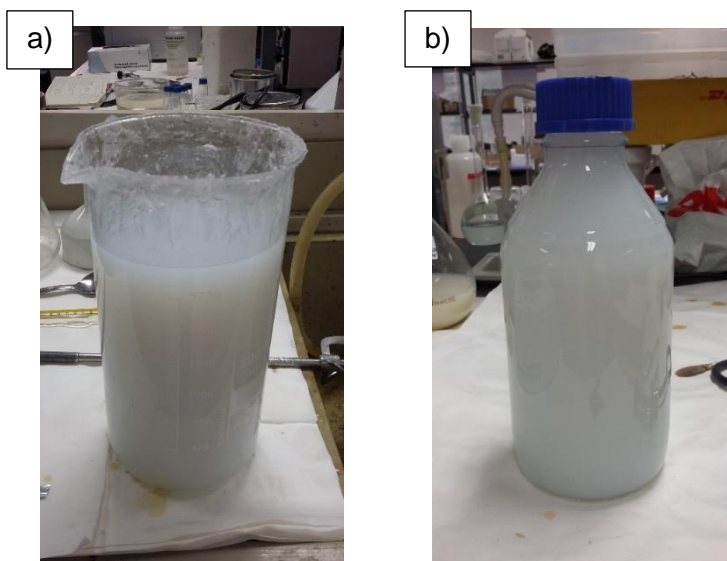


Ilustración 26: Fotografías del compuesto tras el mezclado con una concentración de 19% de SiO_2 en PEG diluido con alcohol.

Al siguiente día se continuó con la fabricación del STF.

Se observaba que el estado de suspensión del compuesto fabricado día anterior no se había cambiado después de una noche en reposo. Entonces, se decidió aumentar la concentración del STF.

Comenzó añadiendo poco a poco más partículas de SiO_2 en el compuesto acompañado de agitación manual constante. La adición de partículas al compuesto se hacía progresivamente más dificultosa debido al aumento de la viscosidad. Alcanzado un cierto punto, el estado era saturado y no se podía mezclar más partículas sólidas. La textura del compuesto era parcialmente seca.



Ilustración 27: Fotografía del compuesto en estado parcialmente seco.

Empleando el mismo equipo de antes (combinación de Ultra- Turrax con agitador magnético, Ilustración 24), el Ultra-Turrax configurado a 3000 rpm y el agitador magnético sin revoluciones y a 100 grados Celsius de temperatura.

Pocos segundos después del arranque, el Ultra- Turrax dejó de funcionar debido a que el compuesto estaba demasiado seco. Se tuvo que diluir el compuesto con más alcohol, aproximadamente 250 mL de etanol y subir la temperatura del agitador magnético. Durante la primera hora del mezclado la temperatura interna registrada del compuesto fluctuaba entre 35 - 40 grados Celsius.

Como se puede apreciar en la Ilustración 28, la textura que poseía el compuesto tras 2 horas de mezclado era parecida a la vaselina comercial, altamente viscosa y de color blanco translúcido.

La máxima temperatura interna registrada durante el proceso era 50°C. Aceptable porque está por debajo de la menor temperatura de evaporación entre todas las sustancias intervenidas (Etanol a 79 grados Celsius), se asegura que no hace daño al producto final.



Ilustración 28: Mezcla de SiO_2 +PEG200+Etanol después del mezclado.

Como puede observar en la Ilustración 28, el producto apenas tenía fluidez. Aparentemente el producto estaba homogéneo, pero para asegurar una mayor dispersión y para poder realizar después el examen de muestra bajo microscopio electrónico, se añadió 1 L de Etanol más en la mezcla y volvió a trabajar con el mismo equipo de antes durante más de 3 horas con la configuración mostrada en la Tabla 5.

| | Velocidad (rpm) | Temperatura (°C) |
|---------------------------|-----------------|------------------|
| ULTRA-TURRAX | 6000 | 200 |
| AGITADOR MAGNÉTICO | - | 50 |

Tabla 5: Configuración final de las máquinas.

El alcohol etílico en el compuesto SiO_2 /PEG200 diluye la viscosidad del polímero y de esta forma se podía conseguir un producto de mayor fluidez y manejabilidad (Ilustración 29). Adecuado para la aplicación posterior.

Resumiendo, se calcula que en total se había podido añadir un total de 300 gramos de partículas de sílices dentro de 0,75 litros de PEG200 y más de 3 litros de alcohol etílico empleado. Cuya concentración analítica final según la ecuación 1 es aproximadamente 27% en peso de SiO_2 .



Ilustración 29: STF diluido con alcohol etílico.

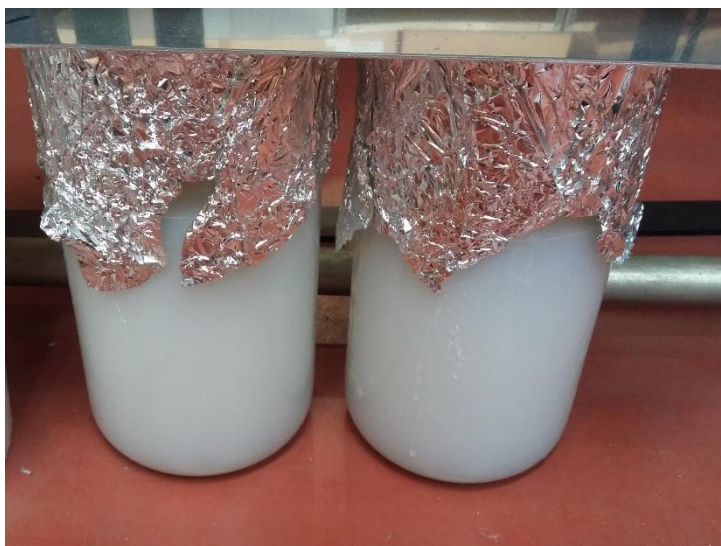


Ilustración 30: 3 litros de STF diluido con alcohol etílico.

3.3.3 Estado de dispersión de STF

Estudio de una pequeña muestra del producto final bajo el microscopio invertido Olympus GX71 podemos observar que, el estado de dispersión es aceptable.

Las diminutas manchas negras que se aprecian en todas las micrografías son esferulitas ¹, por definición, son agregados esféricos que van de un tamaño submicroscópico a milímetros de diámetro en casos extremos.

¹ W. BILLMEYER, F., 1975. Estructura y propiedades del volumen de los polímeros. Morfología y orden en los polímeros cristalinos. In: Ciencia de los polímeros reimpressa ed. Reverte. *Estructura y Propiedades Del Volumen De Los Polímeros. Morfología y Orden En Los Polímero Cristalinos*, pp. 141-164 ISBN 8429170480, 9788429170481.

En este caso, las esferulitas en la Ilustración 31 a), b) y c) son uniones entre partículas de PEG200 Y SiO_2 , siendo el PEG partícula donante. La sustancia que está alrededor de los agregados es el etanol.

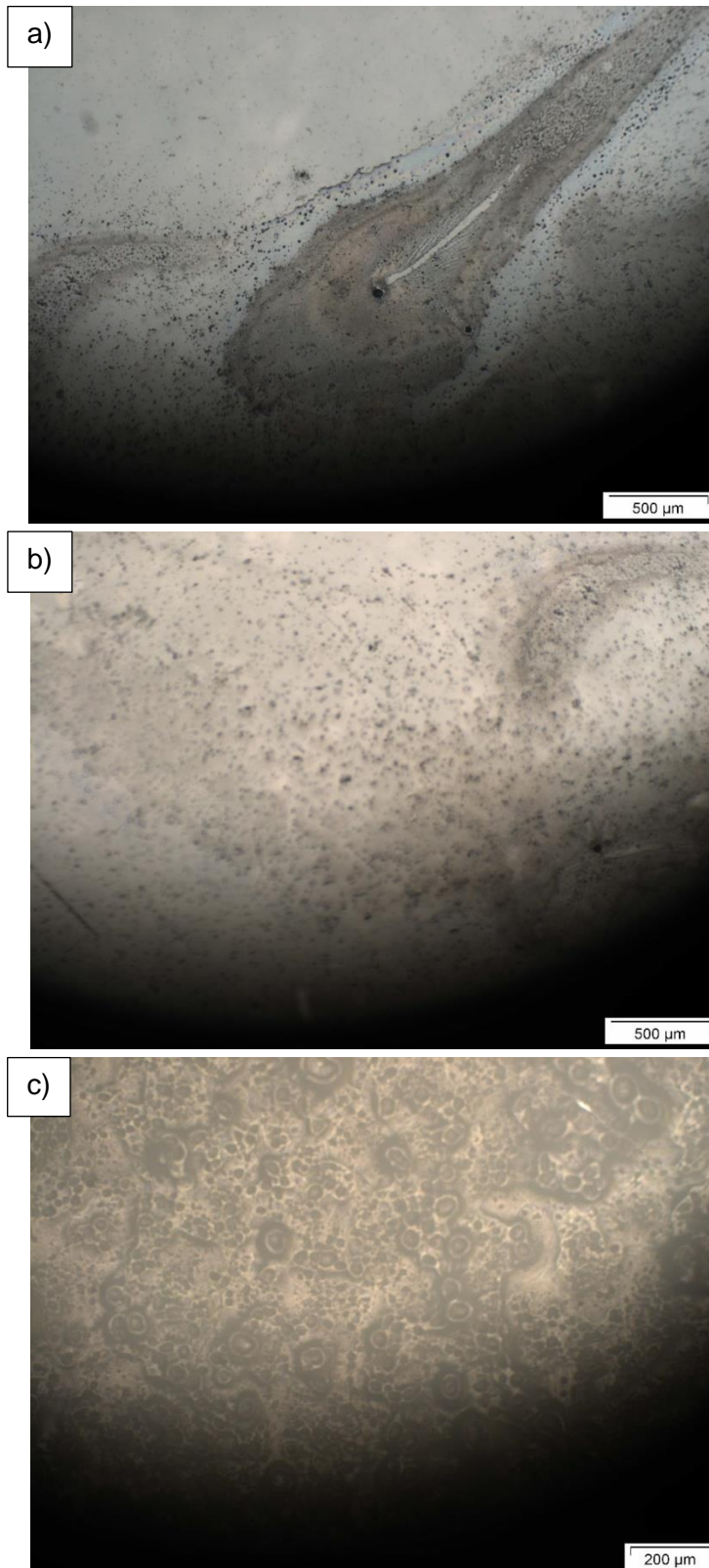


Ilustración 31: Ilustración 31: Micrografías del STF diluido: a) y b) bajo escala 500 micrómetros; c) bajo escala 200 micrómetros.

3.4 Obtención de la tela impregnada de STF

Se recortó 48 telas de Kevlar 204 g/m² dimensión 130 mm x 130 mm. Y se repartió en 8 muestras con 6 telas para cada una.

Antes de todo, se había realizado la limpieza general de todos los útiles que intervenían en el proceso, con agua y alcohol para asegurar que no haya contaminación excesiva durante la fabricación.

El procedimiento detallado es el siguiente:

1. Cada tela de la muestra fue pesada con la balanza digital antes del mojado y se anotaba el valor para calcular el promedio de peso de la muestra posteriormente.
2. Se sumergía las telas en el STF diluido, preparado en el apartado anterior y se dejaba en reposo para que la tela pudiera absorber uniformemente el fluido, como muestra en la Ilustración 33.
3. El baño que contenía el fluido no estaba caliente, por tanto, el trabajo de mojado se realizó a temperatura ambiental y se estimó que la temperatura fue aproximadamente 16°C. Mientras tanto, se precalentaba el horno a una temperatura más alta que la correspondiente de trabajo, debido a que el calor se escapaba bajando de esta forma la temperatura interna durante el tiempo de la introducción de las telas. Las rejillas metálicas estaban colocadas dentro del horno durante el precalentamiento.
4. Las telas fueron comprimidas ligeramente con una placa de acero INCONEL (110 X 110 X 3 mm, 288 gramos) para eliminar el exceso de material y se pesaba cada tela en la balanza para el registro.
5. Durante el secado, la temperatura interna del horno fue medida con un termómetro metido dentro del horno según la Ilustración 34. La intención era mantener la temperatura de trabajo constante, pero se podía permitir una fluctuación de temperatura de $\pm 10^{\circ}\text{C}$ dentro del equipo.
6. Y finalmente, se extraían las telas del horno y se pesaban de nuevo con la balanza.

El mismo procedimiento, Ilustración 35, se había repetido para las 6 muestras, pero variando el tiempo de mojado, la temperatura y el tiempo de secado.

| Nombre muestra | Condiciones de fabricación |
|-----------------------|---|
| Muestra 1 y Muestra 2 | - 10 min mojado - 2 h secado a 50°C |
| Muestra 3 y Muestra 4 | - 30 min mojado - 1 h secado a 80°C |
| Muestra 5 y Muestra 6 | - 1 h mojado - 30 min secado a 100°C |

Tabla 6: Plan de fabricación Kevlar/STF.

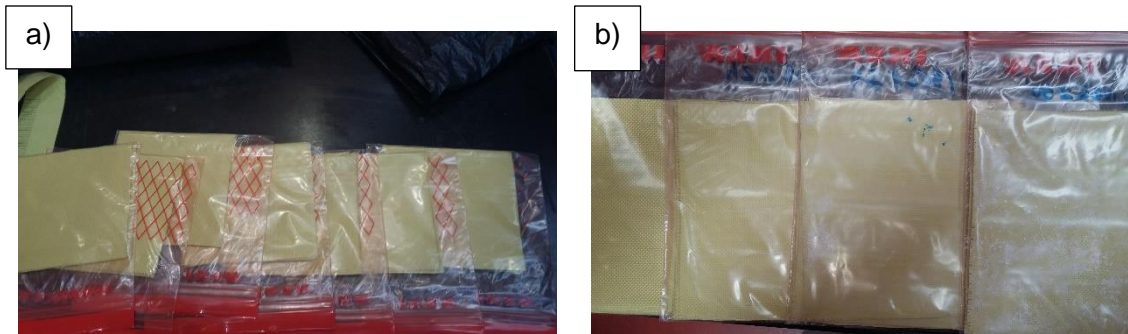


Ilustración 32: a) Las siete muestras de Kevlar 204 g/m2; b) de izquierda a derecha respectivamente: muestra pura, muestra1, muestra 3 y 5.



Ilustración 33: Mojado de las telas.

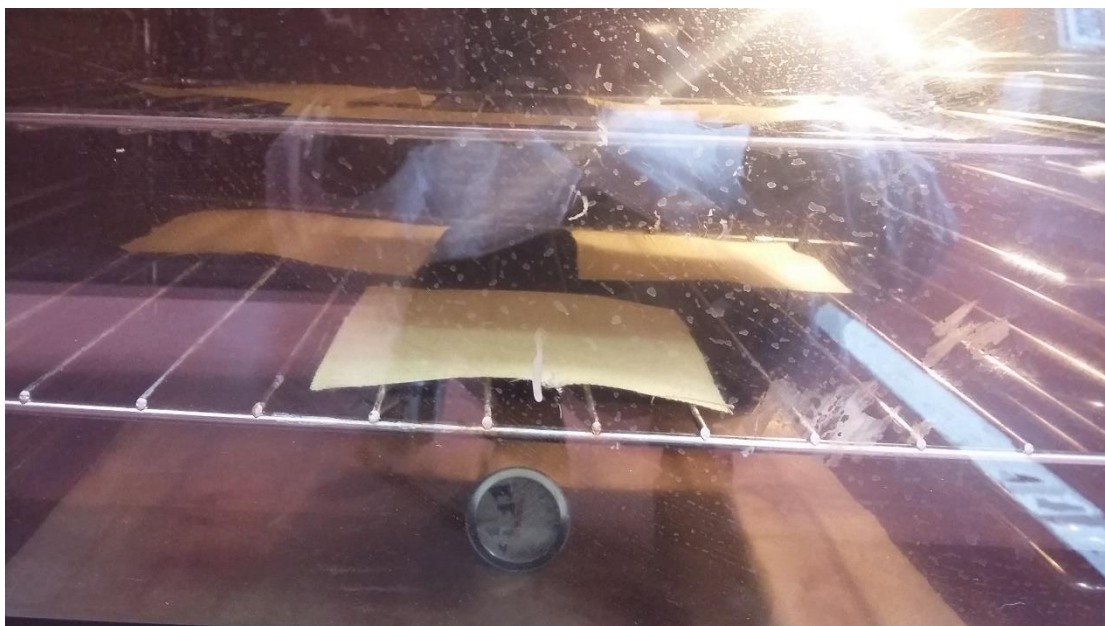


Ilustración 34: Secado en el horno con el termómetro dentro.

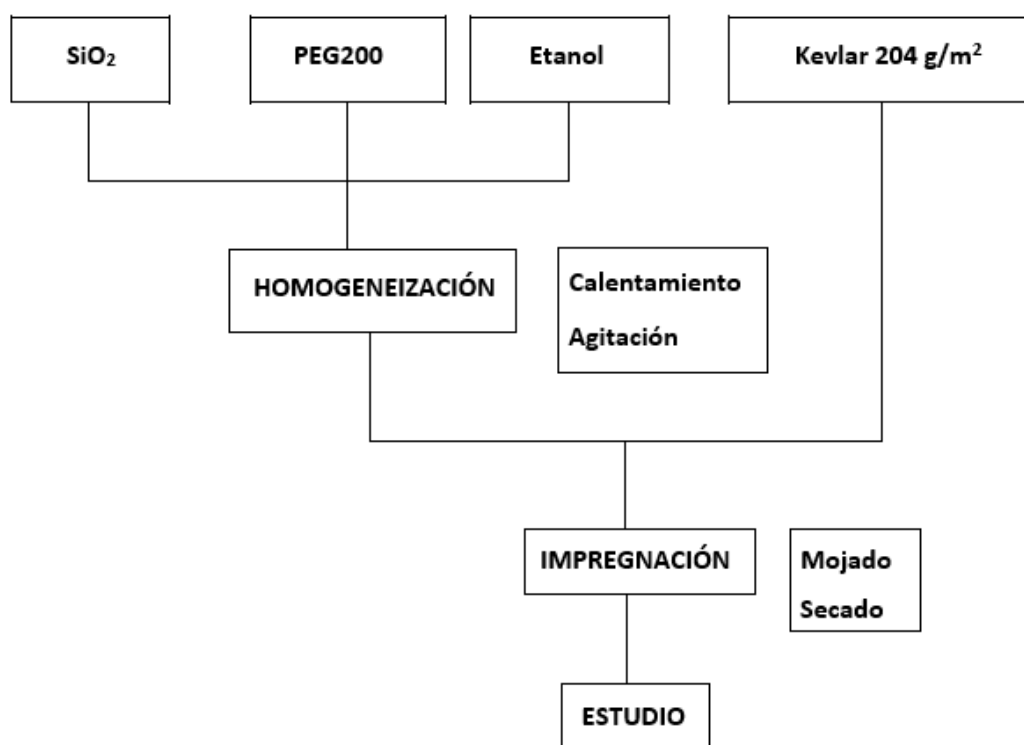


Ilustración 35: Procedimiento de impregnación: telas Kevlar con fluido dilatante.

3.5 Resultados

Durante la fabricación de telas Kevlar impregnadas de STF, se había ido registrando el peso de cada muestra con el objetivo de estudiar qué cantidad de fluido dilatante habían sido capaz de absorber las telas, y dadas las condiciones establecidas para cada muestra. Para poder realizar posteriormente una comparativa entre ella.

La diferencia del peso después del secado y el peso antes de cualquier tratamiento, indicada los gramos de STF absorbidos, se puede observar en la Tabla 7. Entre las 6 muestras de Kevlar/STF, la muestra 2 y la muestra 3 absorbieron la mayor cantidad de STF, aproximadamente un 40 % más de peso que la muestra pura.

Existe una curiosa diferencia de peso entre telas sometidas a mismas condiciones de trabajo. Teóricamente, las muestras 1 y 2 deben presentar el mismo incremento de peso ya que ambas habían sido fabricadas con las mismas condiciones, sin embargo, la diferencia de peso es más bien grande. La muestra 2 presenta casi un 15 % de peso más que la muestra 1.

El mismo fenómeno aparece también en los otros 2 pares de muestras. La muestra 3 tiene un 7% más que la muestra 4. La muestra 5 un 8 % mayor que la muestra 6.

Analizando la superficie externa de las telas, Ilustración 36, se puede observar una fina capa de “escama blanca” que recubre las dos caras de la tela. Se trata del STF en estado seco, esta capa es más evidente en las muestras b) y c) sometidas a temperaturas de 80 y 100°C debido a la evaporación del etanol. En la muestra a) calentada a 50 grados se nota menos este recubrimiento superficial.

| | PURO | M.1 | M.2 | M. 3 | M. 4 | M. 5 | M. 6 |
|---------------------------|-------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Antes del mojado | 3,43 | - | - | - | - | - | - |
| Después del mojado | - | 7,500 | 7,670 | 8,670 | 7,85 | 8,167 | 7,833 |
| Después del secado | - | 4,335 | 4,825 | 4,860 | 4,625 | 4,658 | 4,383 |
| INCREMENTO de peso | - | 0,905 | 1,395 | 1,430 | 1,195 | 1,228 | 0,953 |
| %² | - | 26,38 | 40,67 | 41,69 | 34,84 | 35,80 | 27,78 |

Tabla 7: Peso medio de cada tela registrado. Medidas en gramo.

² % = (INCREMENTO DE PESO) * 100 / (PESO PURO)

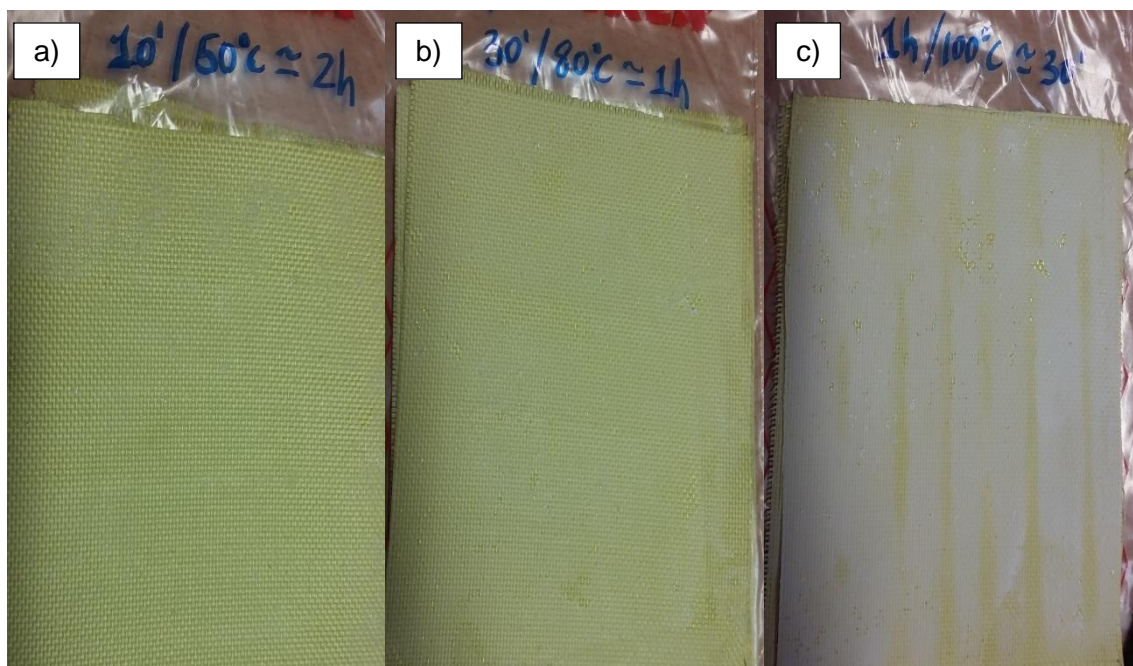


Ilustración 36: Estado superficial de: a) Muestra a 50 °C; b) Muestra a 80 °C; c) Muestra a 100 °C.

3.6 Discusión

Una explicación posible para el curioso resultado obtenido de la Tabla 7 puede atribuirse a las propiedades físicas y químicas de los materiales intervenidos.

A mayor tiempo de mojado en reposo, la absorción de partículas sólidas en los tejidos es mayor, incrementado de esta forma el peso medio de las telas Kevlar.

Sin embargo, a partir de un cierto tiempo, el incremento de peso se estabiliza porque los huecos existentes entre-hilos del tejido son obstruidos por las partículas sólidas de sílice, que impide la entrada de más SiO_2 en la tela. El número de partículas en la tela se mantiene constante y, por tanto, la diferencia de peso entre tiempos mayores de mojado que tiempos menores se hace menos evidente. Li, K., (2012) [33] realizó estudios sobre muestra UHMWPE/STF que mostraba similar fenómeno de estabilización del porcentaje de incremento de peso a partir de 48 horas de mojado en estático.

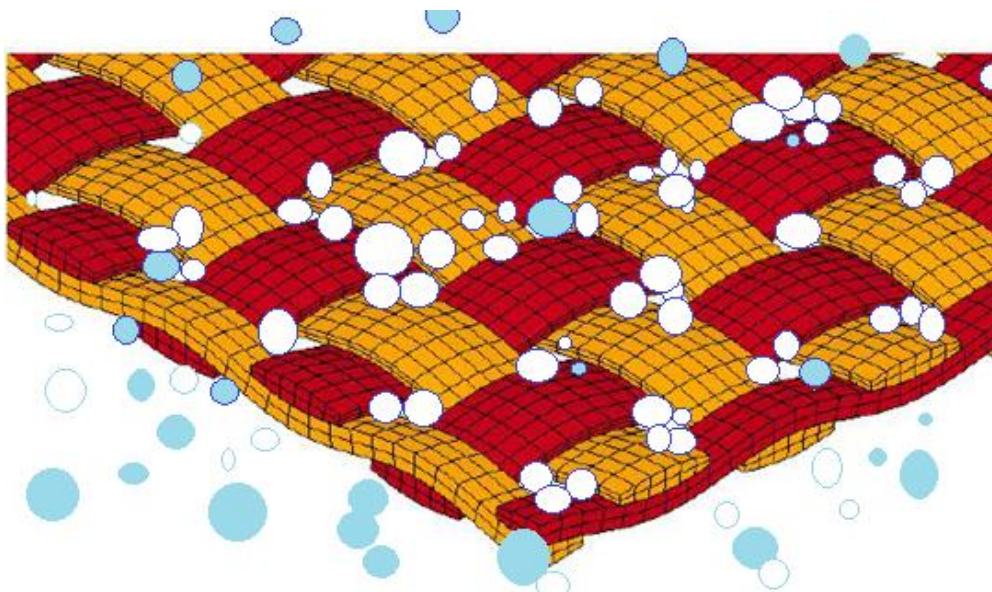


Ilustración 37: Tela impregnada de partículas sólidas. Dibujo no a escala. Fuente de imagen Nilakantan, G. [40].

Esta es una de las razones que explican porque las muestras 5 y 6, que habían sido sumergidos en el fluido durante más de 1 hora, no presentan mayor peso que las muestras sometidas a tiempos de mojado más cortos. Cabe destacar que, en este caso, la muestra 3 absorbió 40 % más de peso que la muestra pura durante la mitad de tiempo que las muestras 5 y 6.

Por el otro lado, el compuesto dilatante preparado quizás no estuvo suficientemente diluido y presentó cierta viscosidad que dificultó la penetración de las partículas sólidas dentro de los hilos del tejido. La poca fluidez del medio reduce la capacidad de absorción de la tela Kevlar y así se puede explicar el poco incremento de peso en todas las muestras.

Otros factores que pudo haber afectado a estos resultados probablemente son: la temperatura de mojado, el ambiente de trabajo de ese día no era el más óptimo. La temperatura en el exterior el día 30 de abril experimentó bastante fluctuación durante todo el día, varió entre 10 y 16 grados Celsius. La zona de trabajo no es hermética, la humedad del exterior (día lluvioso) invadió el ambiente interno y aunque no se había medido la temperatura exacta que tenía el STF diluido, es razonable deducir que fue relativamente más baja que el ambiente al que se encontraba.

La importancia del factor temperatura en este caso es superior a otros, porque está inversamente relacionado con la viscosidad del medio de suspensión del STF. Es decir, al aumentar la temperatura de trabajo, la viscosidad del PEG200 se reduce.

El factor humano también podía ser causa significativa para entender las coincidencias entre muestras con diferente configuración. El orden de fabricación que se siguió fue aleatorio, es decir, no se hizo primero la muestra 1, luego la muestra 2 y después la muestra 3 así sucesivamente, sino que aprovechó los largos momentos de secado de una muestra para comenzar con el mojado del siguiente.

El orden real de fabricación había sido: Muestra 1 → Muestra 5 → Muestra 3 → Muestra 6 → Muestra 4 → Muestra 2.

Además, la tarea de compresión con la placa de metal que acompañaba al proceso de mojado, quizás no se fue llevada a cabo correctamente. Las finalidades principales de esta tarea fueron, por un lado, eliminar el exceso de material después de extraer las telas del baño y evitar el goteo; y, por otro lado, realizar una ligera compresión en el tejido cubierto de fluido viscoso, lo cual permitiría una mayor penetración de las partículas de sílice en la tela. De esta forma la fricción entre fibras aumentaría.

Hubo un cambio en la forma de comprimir. Para fabricar las 2 primeras muestras (la 1 y la 5) se fue comprimiendo tela por tela. Sin embargo, se comprobó que de esta forma la fabricación no era muy productiva. Entonces, a partir de la muestra 5, se empezó a comprimir un conjunto de 6 telas de una muestra apiladas.

Una compresión excesiva pudo afectar al peso final de la tela mojada.

En el análisis del aspecto superficial de una tela de cada muestra se pudo descubrir que existe un recubrimiento de color blanco sobre la superficie de las telas. Esta evidencia es más grande para muestras sometidas a mayor temperatura de secado. Se trata de STF seco debido a que el alcohol se había evaporado del conjunto.

Para una mejor compresión de la cantidad de STF impregnado en las telas de aramida se realizó un estudio microscópico demostrando que la existencia de una obstrucción de los huecos entre hilos del tejido Kevlar. Para una muestra de tela no tratada, como muestra en la Ilustración 38 a), el espacio entre hilos es regular y la forma es definida.

Sin embargo, las muestras impregnadas de STF, como muestran en la Ilustración 38 b), c) y d) poseen agujeros más reducidos y no definidos debido a que los huecos entre hilos del tejido están obstruidos por las partículas sólidas. Sobre todo, a la muestra tratada a 100 grados Celsius, los huecos son de forma más alargadas y no regulares, por la presencia de más recubrimientos de STF seco en la superficie.

La comparación microscópica realizada para las dos muestras intermedias no presenta gran diferencia de tamaño y forma de los huecos.

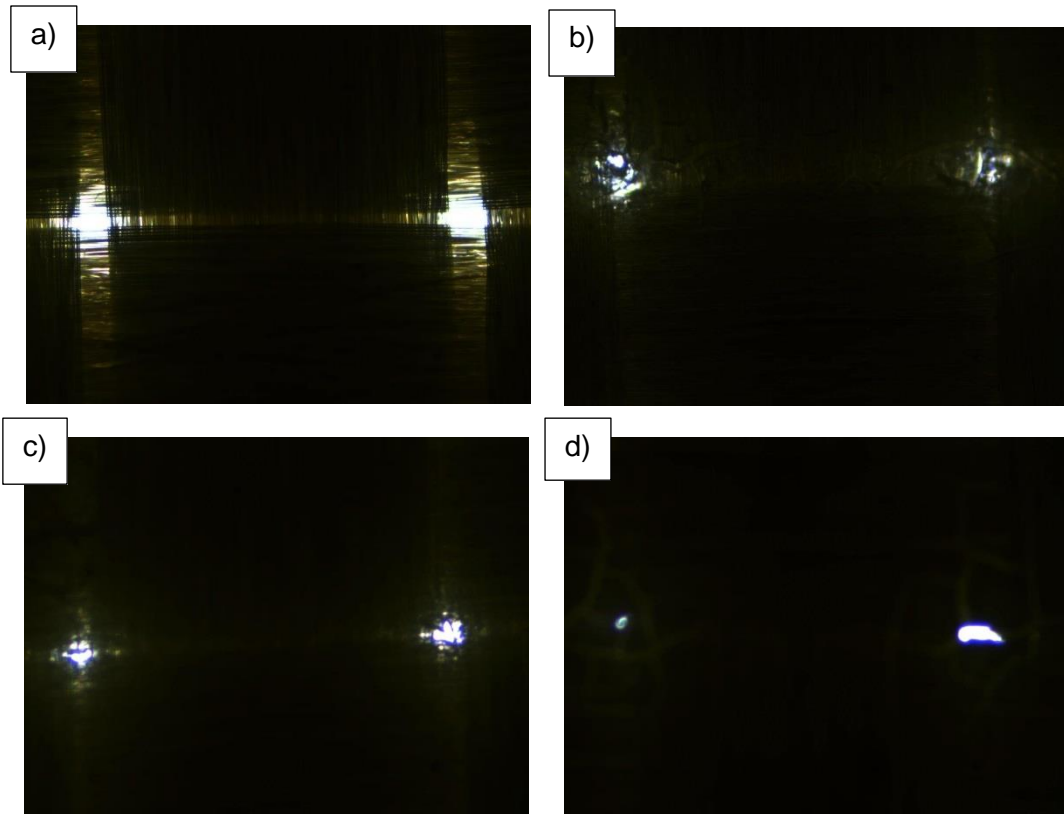


Ilustración 38: Micrografías de: a) Kevlar pura; b) Kevlar/STF a 50 grados Celsius; c) Kevlar/STF a 80 grados Celsius; d) Kevlar/STF a 100 grados Celsius.

CAPÍTULO 4: REALIZACIÓN DE ENSAYOS DE STF/ARAMIDA

FRENTE A ARMA BLANCA

En este capítulo se presenta la metodología experimental para el análisis de las muestras de STF/aramida mediante ensayos de perforación de cuchillo, lanzados de manera controlada con distinta energía.

En este capítulo se calcula el rendimiento mecánico de las muestras fabricadas en el capítulo anterior frente a las que presentan las aramidas sin tratar. La comparación se ha realizado procurando mantener la misma densidad areal (igualdad de peso) y con igual número de capas.

Para el primer estudio, se procede de forma que las masas de las muestras sean la más parecida posible para poder realizar las comparativas entre muestras tratadas y puras, y entre telas tratadas de distinta forma, mientras que en el segundo estudio, muestras de 4 capas de tela de cada tipo son apiladas y ensayadas.

4.1 Tela bajo torre de caída con cuchilla

4.1.1 Materiales ensayados

La Tabla 7 muestra la masa obtenida mediante la combinación de diferentes capas de aramida. Como se ha explicado, la configuración que tiene un peso similar es la formada por 4 capas de telas de la muestra pura y 3 capas de telas impregnadas de cada tipo. Para el segundo estudio, las muestras fueron formadas por 4 capas de tela de cada tipo.

| nº telas | pura | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| 1 | 3,43 | 4,335 | 4,825 | 4,86 | 4,625 | 4,658 | 4,383 |
| 3 | 10,29 | 13,005 | 14,475 | 14,58 | 13,875 | 13,974 | 13,149 |
| 4 | 13,72 | 17,34 | 19,3 | 19,44 | 18,5 | 18,632 | 17,532 |
| 5 | 17,15 | 21,675 | 24,125 | 24,3 | 23,125 | 23,29 | 21,915 |
| 6 | 20,58 | 26,01 | 28,95 | 29,16 | 27,75 | 27,948 | 26,298 |
| | | 5% | -6% | -6% | -1% | -2% | 4% |

Tabla 8: Por igualdad de peso.

4.1.2 Máquina y mecanismo

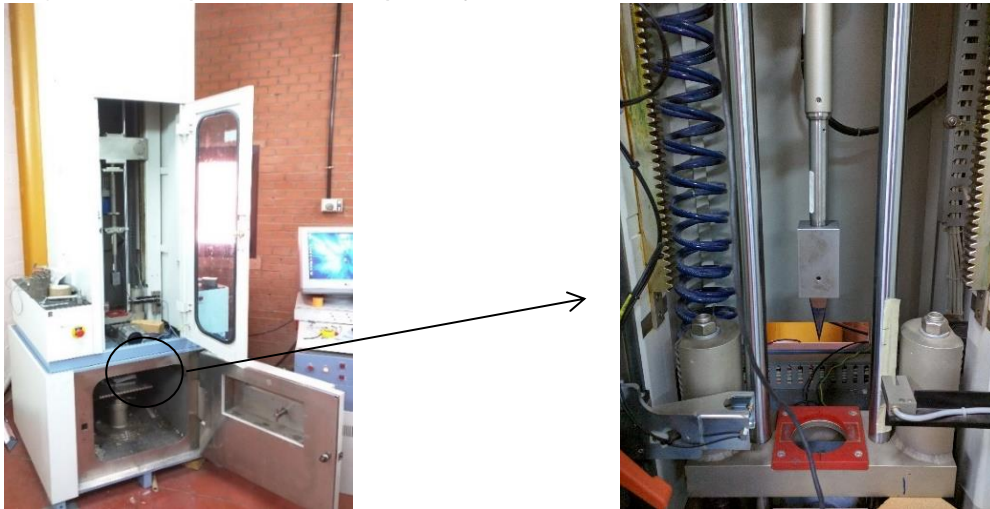
Para la realización de los ensayos de impacto de cuchillo se empleó una torre de caída (INSTRON, CEAST 9350 Drop Weight Tower Impact System) situada en el laboratorio dirigido por el profesor José Antonio Loya del Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la Universidad Carlos III. La disposición de trabajo se puede observar en la Ilustración 39: El funcionamiento de la máquina consiste en configurar la altura y la masa de caída en el programa del ordenador adjunto. Los sensores que el equipo dispone se encargan de registrar las velocidades y aceleraciones durante el ensayo. Comenzando desde el momento de impacto hasta la

parada final del cuchillo que atraviesa la muestra y se queda incrustado en el backing material. A partir de estos datos, el software es capaz de elaborar un gráfico con las 3 curvas fuerza, energía y velocidad, en función de tiempo.

El cuchillo está instalado en el extremo inferior de la columna. En la placa base se posiciona la muestra a ensayar. La masa de caída que acompaña a la columna vertical pesa siempre 4,485 Kg.

Las alturas de impacto son determinadas ensayando las muestras de Kevlar pura en varias pruebas con el fin de encontrar la altura máxima de caída libre.

Se asegura en cada impacto que la masa de caída (colocada en el medio de la columna vertical) no choque con el tope rojo situado en la parte inferior de la torre.



El motivo es evitar registros erróneos debido a la sensibilidad de los aparatos detectores que dispone el equipo. Cuando la masa golpea el tope, se genera vibraciones no amortiguadas que pueden disturbar el resultado gráfico del ensayo.

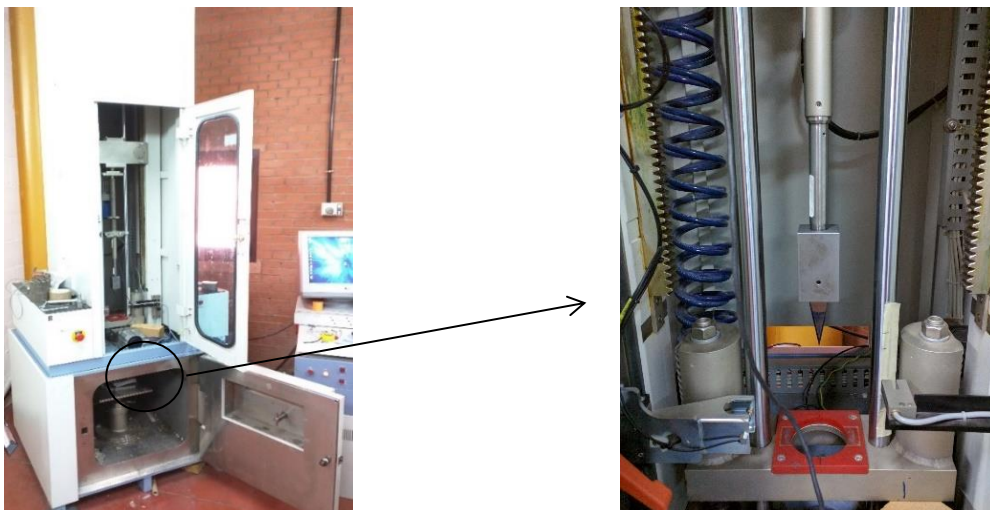
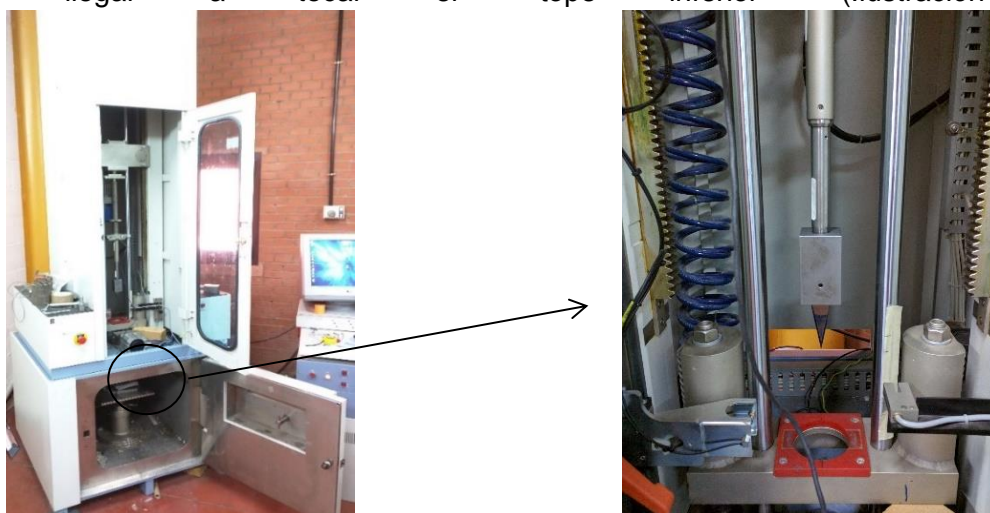


Ilustración 39: Izquierda, Torre de caída empleada. Derecha, zoom del Tope inferior de color rojo.

4.1.3 Alturas de caída

Las telas puras pesan menos que las telas tratadas debido a que estas no están impregnadas de suspensiones coloidales. Las superficies de las telas no están cubiertas de partículas sólidas. Cuando entra en contacto el filo del cuchillo con las fibras de la tela, el rozamiento que produce es menor que con las fibras que contienen partículas sólidas. Es lógico pensar que, la resistencia de penetración de la tela pura es también menor que la tela impregnada.

Se establece que la altura máxima a la que el cuchillo puede atravesar la muestra pura sin llegar a tocar el “tope inferior” (Ilustración 39



es 130 mm, siendo la altura “límite” de ensayo para todas las demás muestras.

Entonces, las alturas de referencia de ensayos son: 130 mm, 100 mm y 50 mm. Según el valor de la altura que introduzcamos, el software que controla los parámetros principales de la torre calcula automáticamente las condiciones iniciales de ensayo, como muestra en la Tabla 9.

| Altura de impacto (mm) | Energía de impacto (J) | Velocidad de impacto (m/s) |
|------------------------|------------------------|----------------------------|
| 130 | 5,72 | 1,60 |
| 100 | 4,40 | 1,40 |
| 50 | 2,20 | 0,99 |

Tabla 9: Condiciones de impacto. Programa ordenador CEAST.

4.1.4 Cuchillo (Engineered Knife Blades)

La hoja de cuchillo seleccionada tiene un diseño normalizado según el estándar americano NIJ Standard–0115.00 (Apéndice A). La hoja cortante simula una cuchilla de cocina grande, conocido también según este estándar como S1.

La cuchilla posee una punta puntiaguda, doble filo y una columna vertebral rígida. Es más gruesa comparado con el cuchillo de único filo tipo P1.

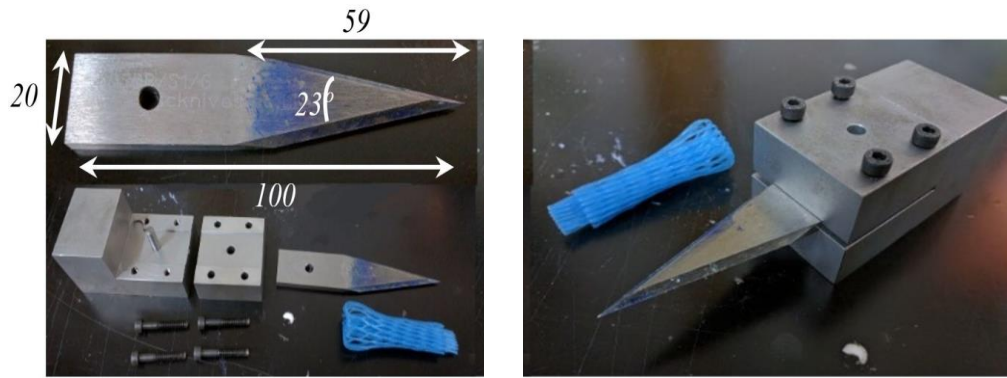


Ilustración 40: Izquierda, dimensiones de la cuchilla y la herramienta de adaptación. Derecha, configuración de la cuchilla en el adaptador.

4.1.5 Ángulo de incidencia

El ángulo de incidencia en este caso se refiere al ángulo que existe entre la dirección de caída del cuchillo y la normal de la línea tangente al punto de impacto.

Para dicho ensayo, todas las telas de una muestra son planas y lisas, no tienen curvatura. Y que la torre de ensayo es vertical. El ángulo de incidencia más sencillo es 0° .

Como a la misma muestra se le somete varias pruebas de impacto variando la altura de caída del cuchillo. Para no interferir cada corte, se movía la posición de la muestra antes de iniciar un nuevo impacto, cambiando de esta forma el punto de impacto. Sin embargo, el ángulo de incidencia se mantiene siempre en 0° .

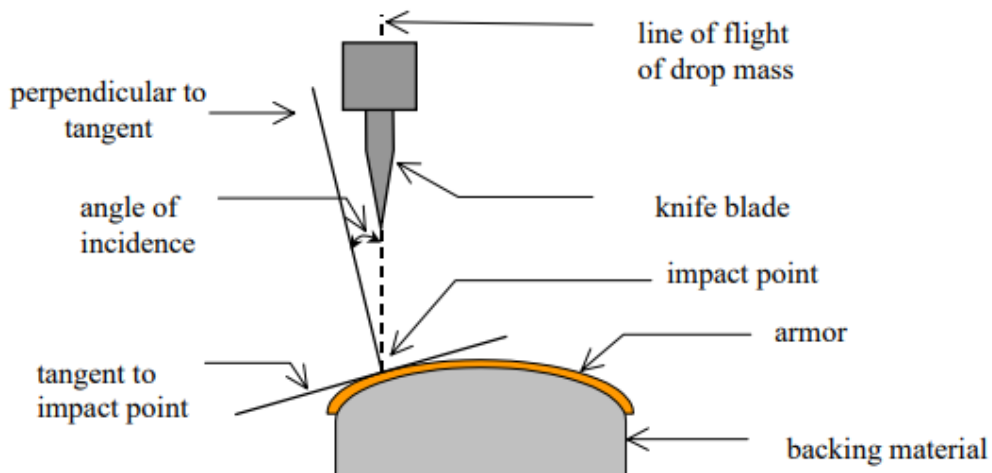


Ilustración 41: Esquema indicativo del ángulo de incidencia.

4.1.6 Backing material

Para detener el cuchillo y para sujetar la muestra, se seleccionó corcho natural como backing material, ya que ofrece una baja resistencia a la penetración como son espumas, gelatinas o plastilinas balísticas habitualmente empleadas.

Las dimensiones del corcho son: 7,6 x 7,6 x 7,6 cm³, alojado en un cerco metálico de perímetro: 8 x 8 cm²

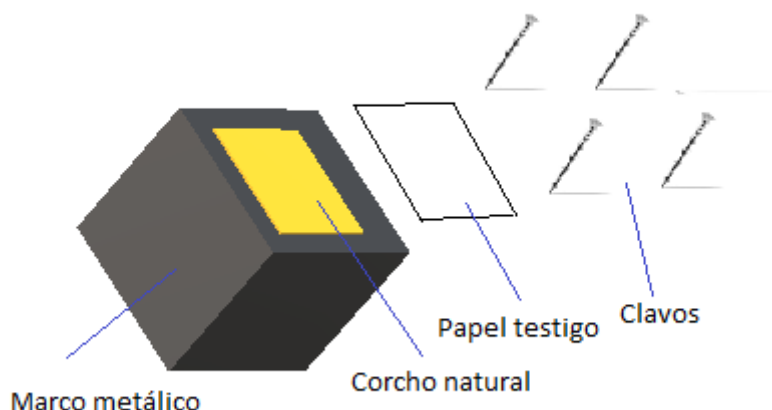


Ilustración 42: Boceto de la configuración del backing material.

4.1.7 Profundidad de penetración

Del análisis de la profundidad de penetración se permite deducir si la muestra de Kevlar impregnada de STF está mejorada o no de rendimiento a la resistencia a la penetración.

Para analizar la profundidad se empleó “papel testigo” (papel blanco comercial DIN 4) ya que es fácil de encontrar, no opone resistencias al impacto y, sin dificultad, se podía dejar marcado el ancho del corte. Sabiendo las dimensiones de la cuchilla y el ancho de corte y, aplicando trigonometría se podía obtener la longitud de penetración de la cuchilla.

La colocación de dicho papel testigo fue por encima de la muestra, como refleja en la Ilustración 42.

Detalladamente, la profundidad de penetración de cada muestra se calcula aplicando la siguiente fórmula:

$$prof. = \frac{A}{2 * \tan \frac{\alpha}{2}} \quad (2)$$

Siendo,

Prof.: la profundidad de penetración

A: la anchura del corte

α : el ángulo del cuchillo S1

Es equivalente usar la tabla de “conversión para profundidad de penetración” perteneciente al estándar NIJ Standard–0115.00 (ver Apéndice B), tenido como dato las anchuras de corte.



Ilustración 43: De izquierda a derecha: papel testigo; proyector de perfil; aumento X20 de un corte.

4.2 Resultados

Tras los ensayos de impacto, con la ayuda de un proyector de perfiles se pudo medir las anchuras de corte.

Aplicando la ecuación (2) se podía sacar la penetración de cada caso.

4.2.1 Por igualdad de masa

| PENETRACIÓN | | |
|-------------|--------|--------|
| | 50 mm | 100 mm |
| PURA | 20,868 | 26,914 |
| M2 | 22,367 | 29,661 |
| M3 | 22,586 | 31,852 |
| M6 | 21,657 | 28,367 |
| ENERGÍA MÁX | | |
| PURA | 2,688 | 5,246 |
| M2 | 2,827 | 5,119 |
| M3 | 2,646 | 5,002 |
| M6 | 2,881 | 5,321 |

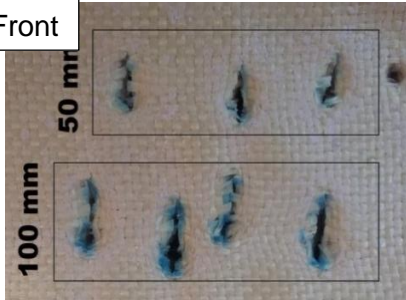
Tabla 10: Profundidad de penetración y energía máxima. Ensayo por igualdad de masa. Unidad de penetración en [mm] y de energía en [J].

El estado superficial de las telas tras el impacto por cuchilla es el mostrado en las siguientes ilustraciones.

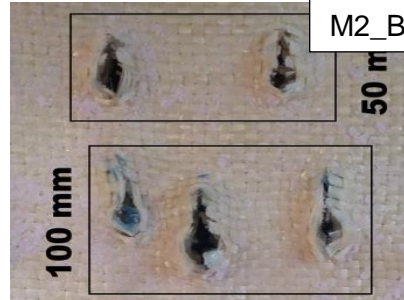
PURA



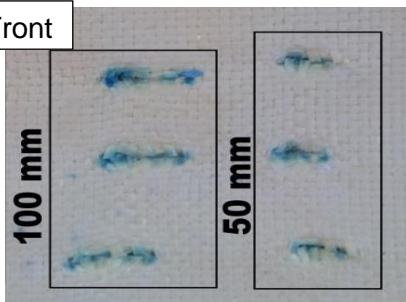
M2_Front



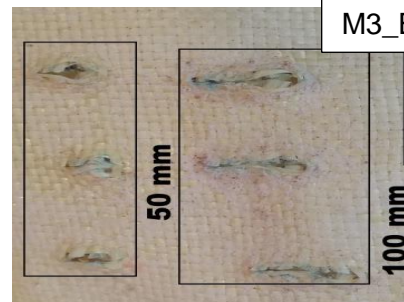
M2_Back



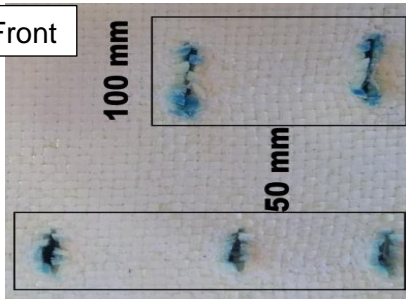
M3_Front



M3_Back



M6_Front



M6_Back

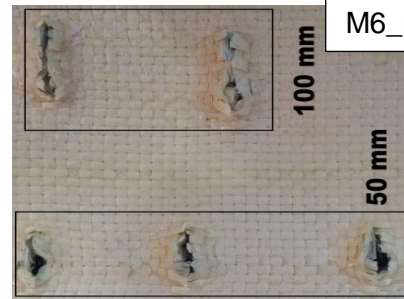


Ilustración 44: Muestra tras el impacto de cuchilla. Por igualdad de masa.

Gráficos “Energía - tiempo” de las distintas muestras bajo impacto a 50 mm y a 100 mm de alturas de caída.

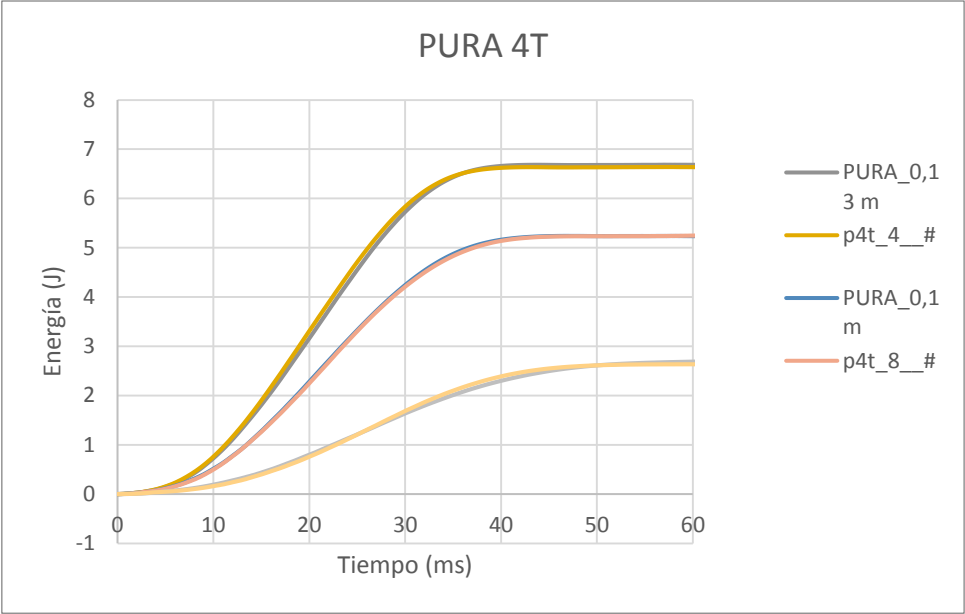


Ilustración 45: Gráfica Energía-Tiempo de la muestra PURA.

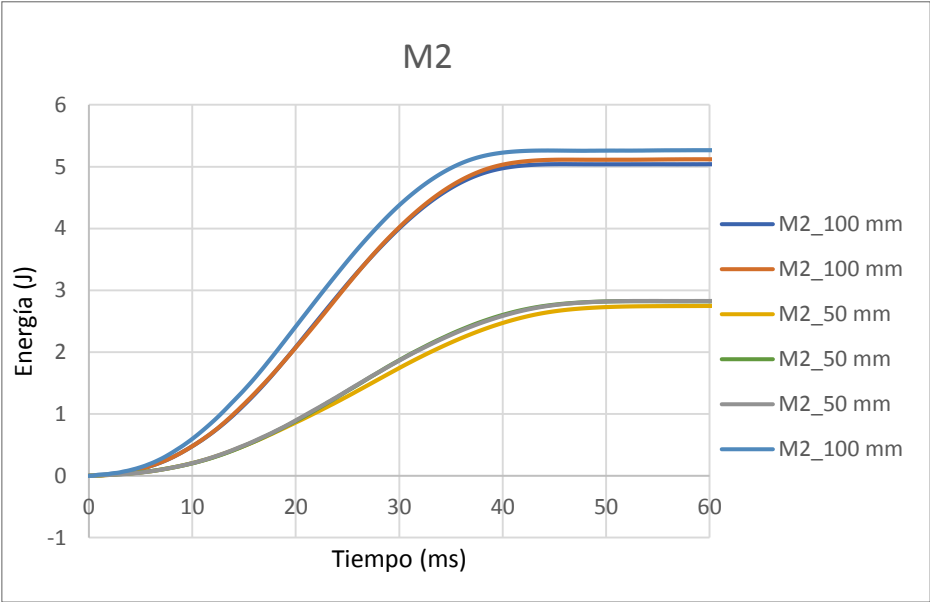


Ilustración 46: Gráfica Energía-Tiempo de la muestra M2.

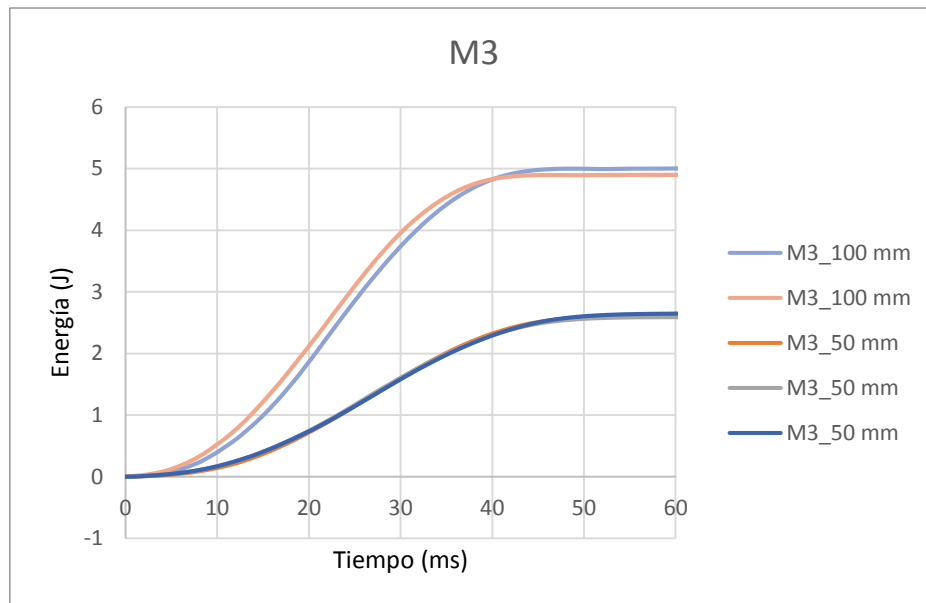


Ilustración 47: Gráfica Energía-Tiempo de la muestra M3.

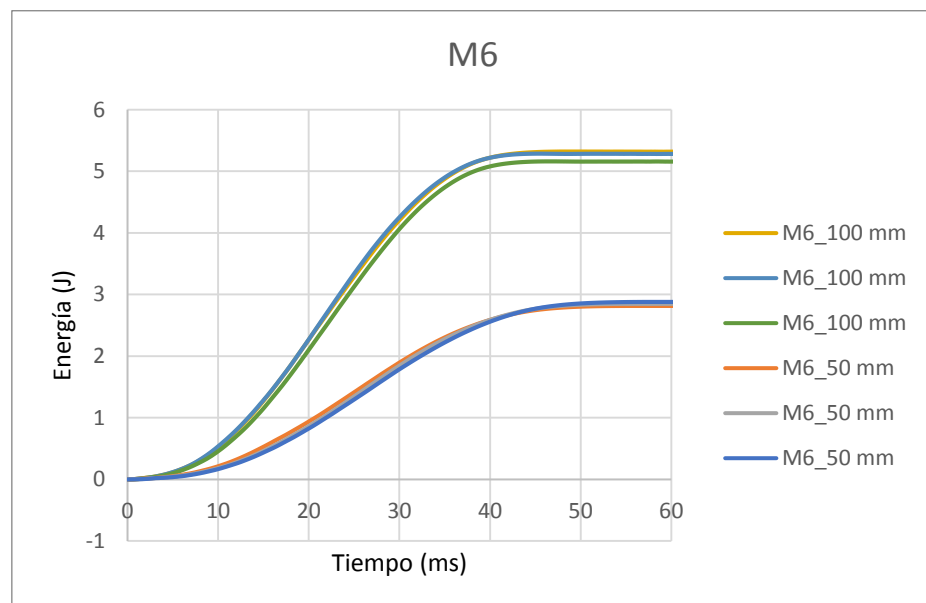


Ilustración 48: Gráfica Energía-Tiempo de la muestra M6.



Ilustración 49: Gráfica Ancho-Altura. Igualdad de masa.

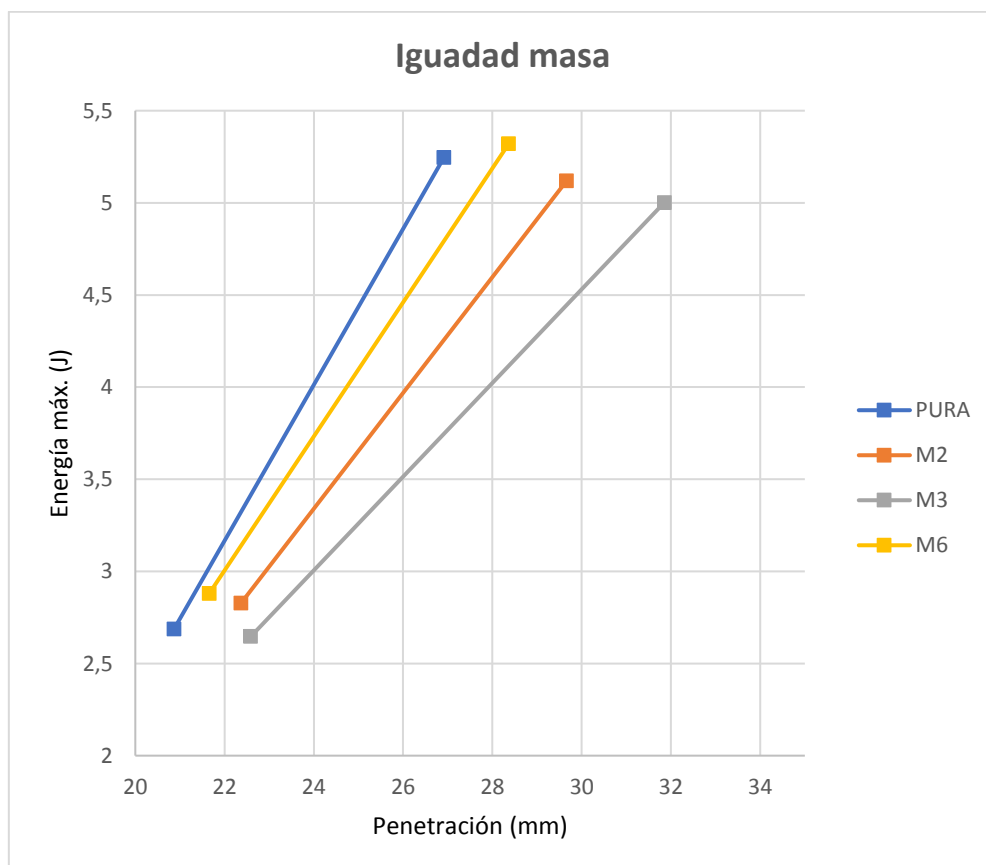


Ilustración 50: Gráfica Energía máxima-penetración. Igualdad de masa.

4.2.2 Por igualdad de capas

Los resultados para el análisis de la influencia de la masa manteniendo el número de capas se presentan en la Tabla 11.

| PENETRACIÓN | | | |
|--------------------|--------------|---------------|---------------|
| | 50 mm | 100 mm | 130 mm |
| PURA | 20,868 | 26,914 | 28,879 |
| M2 | 19,632 | 29,062 | 32,913 |
| M3 | 19,557 | 27,442 | 29,668 |
| M6 | 19,150 | 25,171 | 28,784 |
| ENERGÍA MÁX | | | |
| PURA | 2,688 | 5,246 | 6,685 |
| M2 | 2,759 | 5,050 | 6,515 |
| M3 | 2,607 | 5,092 | 6,474 |
| M6 | 2,569 | 4,929 | 6,224 |

Tabla 11: Profundidad de penetración y energía máxima. Ensayo por igualdad de masa.
Unidades en [mm] y [J].

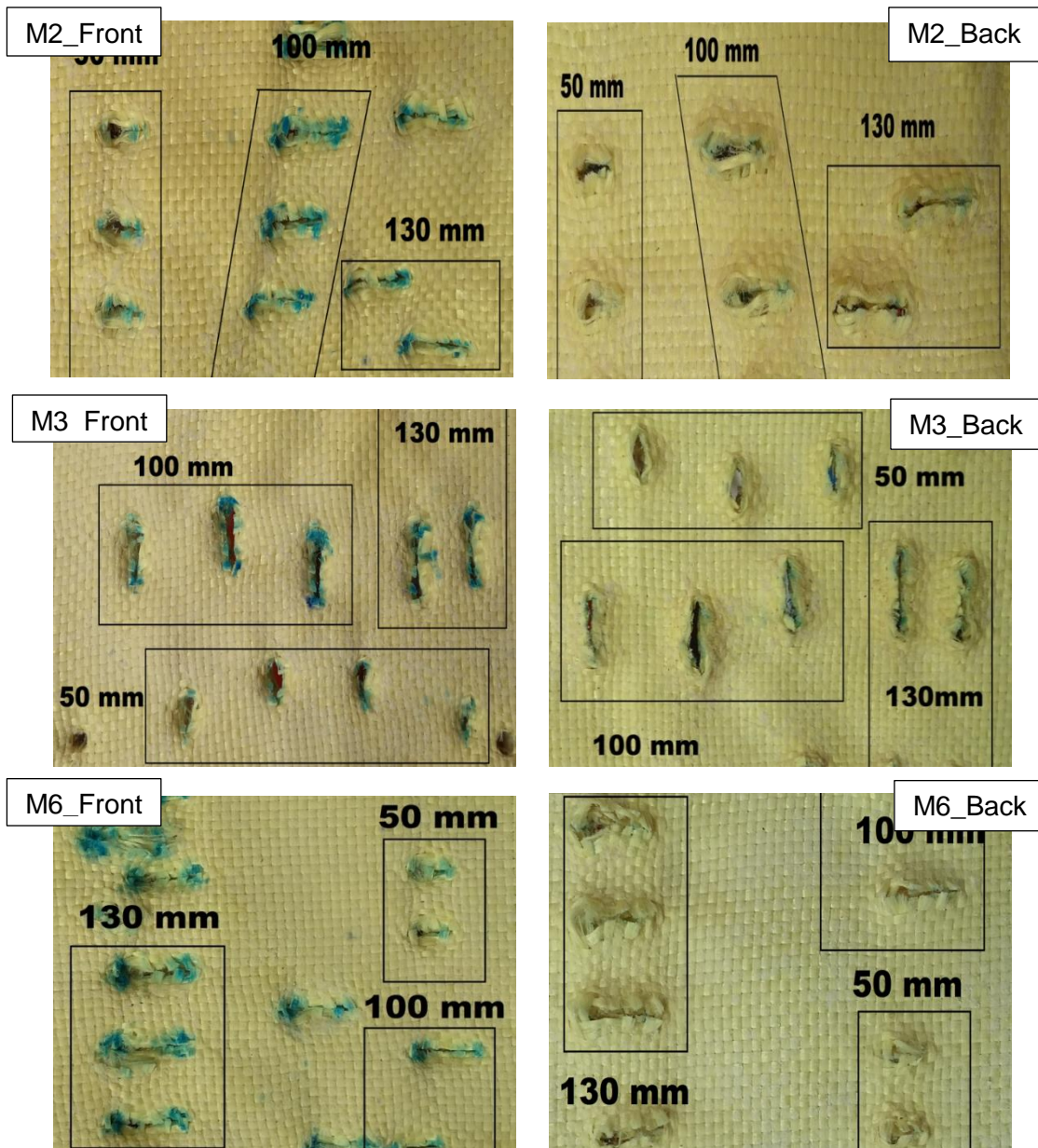


Ilustración 51: Muestra tras el impacto de cuchilla. Por igualdad de capas.

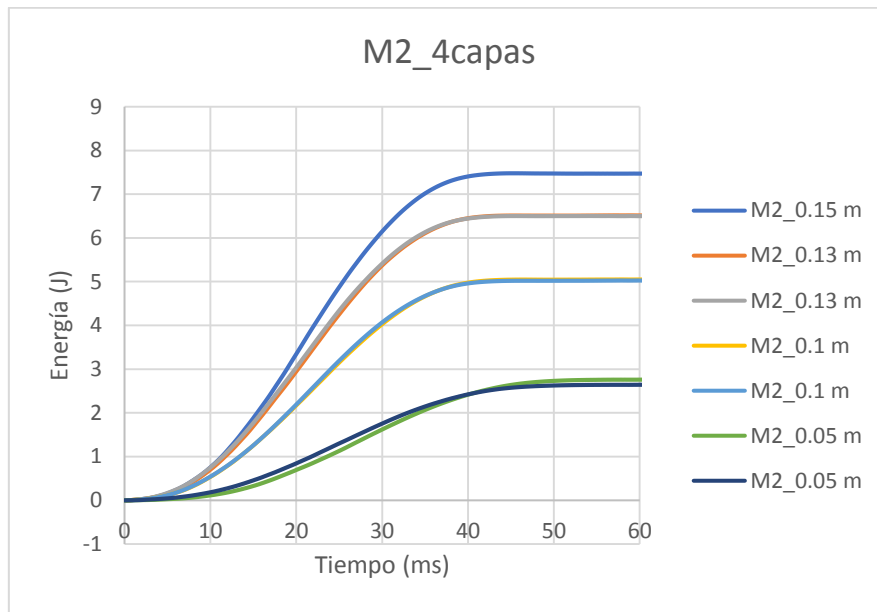


Ilustración 52: Gráfica Energía-Tiempo M2_4 CAPAS.

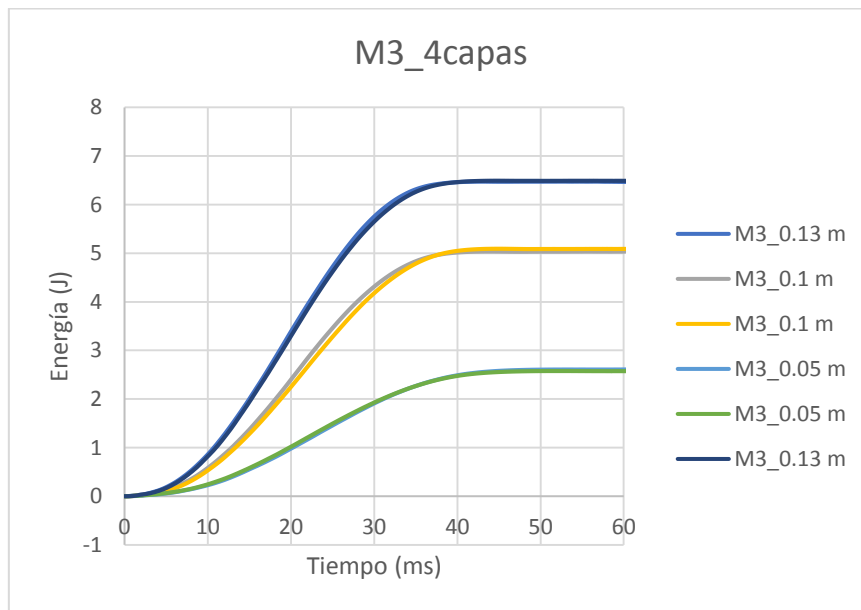


Ilustración 53: Gráfica Energía-Tiempo M3_4 CAPAS.

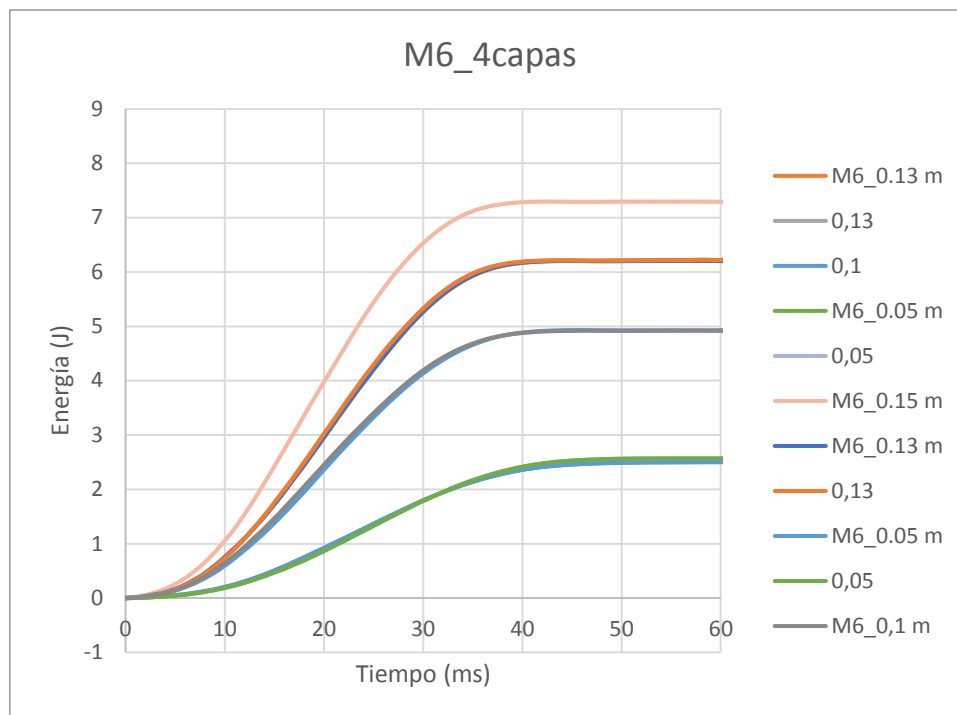


Ilustración 54: Gráfica Energía-Tiempo M6_4CAPAS

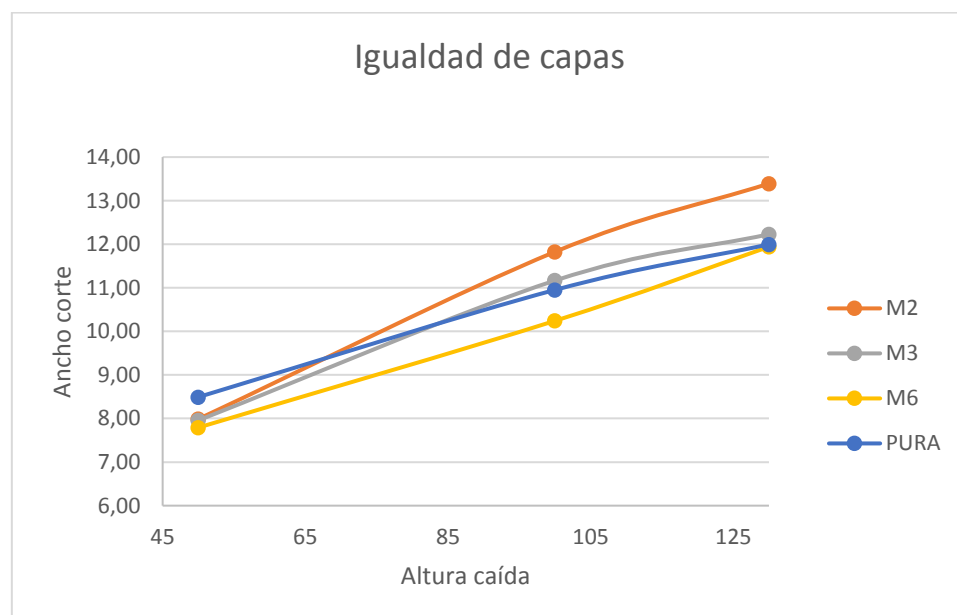


Ilustración 55: Gráfica Ancho-Altura. Igualdad de capas.

4.3 Discusión de resultados

El mecanismo de detención de la cuchilla es un complejo proceso de transformación de energías.

Cuando se posiciona la cuchilla a cierta altura, esta adquiere una energía potencial gravitatoria que se transforma en energía cinética cuyo valor es directamente proporcional a la masa de caída y al cuadrado de la velocidad de impacto.

$$E_p \propto m * g * h \equiv E_c \propto \frac{1}{2} * m * v^2 \quad (3)$$

Las distintas curvas mostradas en las gráficas de “Energía-Tiempo” (Ilustración 45, Ilustración 46, Ilustración 47, Ilustración 48, Ilustración 52, Ilustración 53 e Ilustración 54) justifican esta teoría. Se observa que existe un primer tramo de incremento lineal de la energía hasta un valor máximo, continuado por un segundo tramo que es estable en el tiempo.

La forma que tiene estas curvas indica que toda la energía de impacto ha sido absorbida por el conjunto de Muestra - Backing material, no existe recuperación de energía elástica en este caso. Es decir, la cuchilla es totalmente incrustada en el corcho después del impacto y no rebota como puede ocurrir en algunos casos con otros materiales. Otra observación de estas gráficas es que a medida que se incrementa la altura de caída, se adquiere mayor velocidad de impacto y de esta forma, se desplaza la curva Energía-Tiempo hacia arriba aumentando el valor de la energía máxima.

Durante la penetración, una parte de la energía es absorbida por las telas de Kevlar debido a la fricción entre fibras, que se transforma en deformación plástica de las fibras, en calor, delaminación, ruido etc.[30], [31], y otra parte por el backing material. Consideramos que el proceso de ensayo se ha realizado bajo un método estable, es decir, un mismo equipo repite las mismas medidas, cumple con la repetibilidad. La cantidad de energía absorbida por las telas es la diferencia entre la energía máxima inicial y la absorbida por el corcho natural.

De esta manera, se considera que la cantidad absorbida por el corcho permanece constante para todos los ensayos. Análisis sobre los conceptos, profundidad de penetración y curva de Energía-Tiempo, sirvieron para conocer la capacidad de absorción de energía de cada tipo de muestra.

Como hipótesis teórica, se esperaba que los valores de penetración fuesen menores en el caso de muestras tratadas que la muestra no tratada, debido a que la fricción aumenta por la presencia de partículas sólidas en las fibras de la aramida. Sin embargo, los resultados por igualdad de masa no fueron óptimos.

La Ilustración 49 y la Ilustración 50 son equivalentes. El parámetro profundidad de penetración es dependiente del ancho de corte mediante la ecuación 2 mencionada anteriormente. Según la ecuación 3, se puede concluir que la energía de impacto es directamente proporcional a la altura de caída inicial. La relación entre los parámetros es lineal y de pendiente positiva. En el análisis sobre las gráficas se observa que las rectas están separadas una de las otras con pendiente diferente. La recta que pertenece a la muestra PURA está por debajo de las demás rectas (Ilustración 49. Recta azul), Por un lado, se concluye que la muestra PURA posee mayor resistencia a impacto que las tratadas con STF. Por otro lado, M6 se comporta mejor ante impacto que M2 y que M3.

En otras palabras, para esta configuración de ensayo por igualdad de masa, la muestra no tratada muestra mayor capacidad de absorción de energía de impacto que las muestras impregnadas de partículas sólidas. Entre las telas tratadas, a una penetración concreta, la muestra 6 es capaz de absorber más energía de impacto que M2, y que M3. Como puede apreciar en la siguiente tabla de incrementos en porcentaje de penetración,

siendo los resultados de la PURA como referencia, para una energía de impacto a 100 mm, la penetración en M6 es un 5,39 %, M2 un 10,21% y la M3 unos 18,35 % peores que la PURA.

| INCREMENTO PENETRACIÓN | | |
|------------------------|-------|--------|
| | 50 mm | 100 mm |
| PURA | 0,00% | 0,00% |
| M3 | 8,23% | 18,35% |
| M2 | 7,18% | 10,21% |
| M6 | 3,78% | 5,39% |

Tabla 12: Incremento de penetración. Por igualdad de masa.

Los resultados obtenidos para la segunda configuración por igualdad de capas muestran mejores resultados. Existen pequeños aumentos en la resistencia de carga dinámica las muestras impregnadas de STF que la muestra PURA.

En el análisis sobre la Ilustración 55 se aprecia que a baja altura de caída (50 mm), todas las muestras tratadas, M6, M2 y M3 poseen mayor resistencia que la PURA. A medida que se incrementa la altura de caída, las curvas naranjas y grises (M2 y M3 respectivamente) se desplazan por encima de la curva azul (perteneciente a la muestra PURA). La resistencia a carga dinámica de las dos muestras tratadas M2 y M3 empeora a mayores alturas de caída. Sin embargo, M6 siempre se ha mantenido el buen comportamiento a lo largo de la altura. Otro fenómeno destacado de la gráfica se encuentra en el último tramo de registro, las curvas M6, M3 y PURA tienden a converger.

A partir de la ecuación 2 se obtiene las penetraciones de cada muestra a cada altura de ensayo. Los incrementos de penetración que aparecen en la Tabla 13 apoyan el análisis realizado de la Ilustración 55. El signo negativo de los incrementos indica mejora de la muestra respecto de la PURA. Se aprecia entonces que M6 mejora la resistencia a carga dinámica para alturas que están dentro del rango [50,130]. M2 y M3 mejoran al principio, pero rápidamente empeoran. En M3, ese empeoramiento es menor, de 1,96% a 100 mm y de 2,73% a 130 mm.

En resumen, el estudio por igualdad de capas revela que la resistencia a impacto por cuchilla de M6 es mejor respecto de la PURA en todo el rango de alturas considerado, mientras que el comportamiento de las muestras M2 y M3 empeora respecto a la protección de PURA de referencia a partir de 70 mm y 80 mm, respectivamente.

| INCREMENTO PENETRACIÓN | | | |
|------------------------|--------|--------|--------|
| | 50 mm | 100 mm | 130 mm |
| PURA | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| M2 | -5,92% | 7,98% | 13,97% |
| M3 | -6,28% | 1,96% | 2,73% |
| M6 | -8,23% | -6,48% | -0,33% |

Tabla 13: Incremento de penetración. Por igualdad de capas.

Una explicación para los análisis de la primera configuración sería que, debido a la impregnación de partículas sólidas en las fibras, se ha reducido la flexibilidad de las telas. En la Ilustración 44, se pueden observar que el daño producido en las telas impregnadas es más localizado de aspecto limpio y abierto. La ruptura en la zona de impacto para las telas puras es sobre todo por tracción, se aprecian a los hilos tensados y extraídos del lugar, los hilos están más sueltos y la corte cerrada.

El fenómeno de espesamiento en STF/aramida ocurre cuando la velocidad de cortadura es crítica. Partículas de SiO_2 en la superficie presionan a las que están impregnadas dentro de las fibras, se agrupan dando lugar a la formación de hydrocluster que bloquean el movimiento de las fibras y de esta forma, pueden transmitir la fuerza y la energía de impacto hacia partículas y fibras que están en la periferia del punto de contacto. La transmisión se propaga hacia otras capas que están por debajo como figura en Ilustración 56. Sin embargo, en dicho caso, la transmisión de energía no se hizo efectiva. A partir de la zona de corte se deduce que la cantidad de fibras involucradas en la absorción de energía es menor que la muestra PURA.

Por un lado, es probable que la velocidad de impacto a 100 mm de altura no alcanzó la crítica del fluido dilatante fabricado. Por tanto, el fenómeno de espesamiento no se tuvo lugar, y la muestra se encontraba en la etapa de adelgazamiento a cortadura.

Por otro lado, cuando el número de capas es menor, la cantidad de hilos de tela que podían intervenir fue pobre, y por tanto, el área efectiva de absorción de energía es más reducido que la pura.

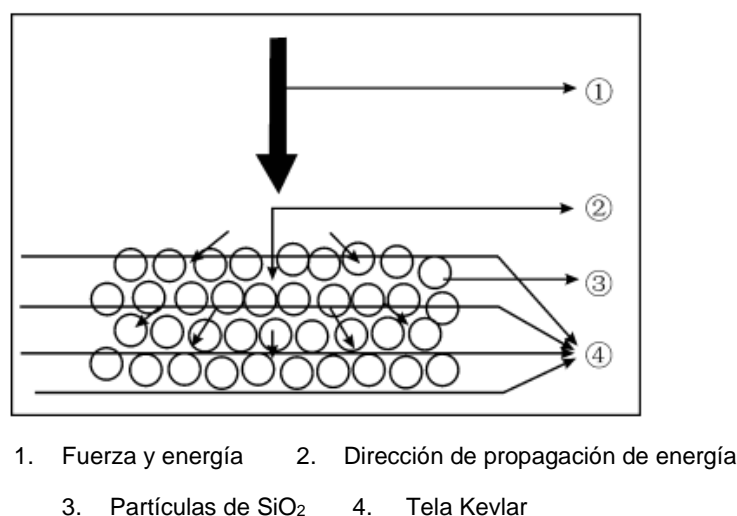


Ilustración 56: Transmisión de energía y fuerza en STF/aramida. [61]

La tela pura mantiene la flexibilidad, es decir, existe mayor libertad de movimiento entre los hilos, en el momento de la penetración, los hilos del punto de impacto son tensados hacia abajo, a medida que avanza la cuchilla, más número de hilos son arrastrados hacia el punto de contacto, estas acciones de la primera capa hacen reaccionar a las fibras de la segunda capa y así a las sucesivas capas. La cantidad de hilos involucrados en resistir el impacto es mayor cuanto mayor sea la energía de impacto inicial.

Debido a que la intervención de fibras en la muestra pura es mayor, la pérdida de energía de la cuchilla en movimiento es más rápido y porque hay más capas de telas, Se manifiesta, por tanto, que el ancho de corte registrado en el papel de testigo es menor en la pura que en las 3 muestras tratadas de 3 capas.

En la segunda configuración es cuando todas las muestras poseen el mismo número de capas (4 telas). La forma que las muestras tratadas absorben la energía de impacto es igual que el explicado para la primera configuración, debido a la formación de agrupamientos de SiO_2 no estables. A diferencia de la pura, los hilos de STF/aramida son menos flexibles debido a la impregnación de partículas sólidas, pero por fricción, estas disipan más energía de impacto que la pura. Estudios sobre la zona de ruptura, se aprecia que el corte es cerrado y con fibras sueltas en los bordes, similar a los cortes en la PURA. Se puede Concluir que en este caso, las muestras tratadas han tenido mejores resultados que en la primera configuración, debido a que se había intervenido más cantidad de fibras en resistir el impacto.

Sin embargo, no todas las muestras han mostrado mejoras respecto de la PURA. Del análisis gráfico se extrae que las muestras M2 y M3, debido a la impregnación de STF, han producido efectos contraproducentes.

M6 se ha comportado bien ante el impacto a cuchilla gracias, quizás, a la fina capa de sílice que se había formado en su superficie. Esta capa actuó de cierto modo como una capa adicional que por fuerza de rozamiento, contrarresta con la fuerza de impacto de la cuchilla. Se manifiesta en producir menor anchura de corte sobre el papel de testigo.

En M2 la formación de una capa de SiO_2 seco en la superficie es inapreciable, además, se comprueba que no se ha formado la fina capa protectora correctamente debido a que la resistencia de esta ante impacto se empeoraba a mayores alturas de caída. Una sospecha para explicar estos resultados es que, como se ha mencionado en capítulos anteriores, M2 es una de las muestras que más pesaba, esto puede significar dos cosas, que el contenido en partículas de SiO_2 es mayor; o que el contenido de alcohol etílico residual es excesivo.

Teniendo en cuenta que la condición de fabricación de esta muestra y como la M1 es a 10 minutos de mojado y a 50 grados Celsius de temperatura de secado, se puede afirmar que en la M2 existe exceso de Etanol que no se había evaporado durante el proceso de secado (Temperatura evaporación de Etanol ≈ 79 grados Celsius). El fenómeno de espesamiento por cortadura es debido a la formación de hydroclusters en la estructura del STF. Es muy probable que, debido a la presencia del etanol, el fenómeno de espesamiento del STF se vio debilitado (Ya que, la cantidad de etanol disminuye la concentración del STF. Según la reología de los fluidos dilatantes, a menor concentración, más alto es el valor de velocidad crítica.).

Es más, estudio realizado por LIU, J. y XIONG, D. [35] reporta que, a bajas concentraciones de suspensión, la polaridad del alcohol etílico interfiere fuertemente en el número de enlaces de hidrogeno existentes entre las moléculas de PEG y las partículas de SiO_2 .

Existen escasos estudios en la literatura que investiguen el efecto del alcohol etílico sobre el comportamiento de STF/aramida bajo impacto a cuchilla. Esto podría ser un punto interesante de estudio para proyectos posteriores.

M3 posee una fina capa de sílice seca en la superficie, pero no es muy destacado. De la misma forma se puede deducir que por las condiciones de fabricación (30 minutos

mojado, 80 grados Celsius secado), quedaban una pequeña cantidad de Etanol sin eliminar de las telas que, impidieron el correcto funcionamiento de STF y por tanto, empeoraron al agrupamiento de las partículas de sílice contenidas entre las fibras.

En resumen, existe una muestra mejorada con respecto de la PURA. Aunque la mejora no es muy destacada, pero puede que sea debido a las configuraciones de ensayo del presente trabajo no estaban suficientemente fabricadas.

Por un lado, resultados obtenidos por investigadores en trabajos demuestran que los tejidos aramida reforzados con STF presentan evidentes mejoras con respecto a los tejidos puros bajo amenaza a cuchilla y a balística. Sin embargo, el número de capas que se empleaban para realizar los ensayos eran en general, mayores y la energía de impacto más reducidos. XIONG Fan *et al.* [61] emplearon muestras de 10 capas de tela aramida. DECKER, M.J., *et al.* [12], realizaron ensayos a impacto para muestras de 15 capas de Kevlar y bajo las mismas condiciones de trabajo que el presente trabajo (Energía de impacto teórica 4,59 J; altura de caída 100 mm y velocidad de impacto 1,40 m/s) etc.

En comparación, el número de capas que se ha empleado en dicho proyecto es menor y la energía de impacto es relativamente mayor.

Por otro lado, la tela aramida empleada en este caso (Kevlar 204 g/m²) no es el tipo de tela que más se adecúa a este tipo de aplicaciones.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1 Conclusiones

En el presente trabajo se ha fabricado tejido aramida reforzado con fluido dilatante para protecciones personales, con objeto de evaluar su rendimiento ante amenaza de arma blanca.

Para ello, se ha diseñado un proceso de fabricación de STF con base SiO_2 /PEG200 adaptado a los dispositivos existentes en el Laboratorio.

Se ha fabricado el STF y aplicado a tejidos de aramida considerando distintos parámetros de fabricación, como el tiempo de mojado, de secado y temperatura de curado.

Las muestras obtenidas se han sometido a ensayos de penetración de arma blanca realizados con una torre de caída de peso modificada.

Se ha analizado la penetración producida según la energía del impacto (variando la altura libre de caída), en muestras de densidad areal semejante y muestras con el mismo número de capas.

La medida de la eficiencia o resistencia a la penetración se compara con el tejido de aramida puro, que actúa como referencia.

La diferencia entre los distintos resultados obtenidos de STF/aramida fabricados es debido principalmente a dos causas: la presencia del etanol en la tela y el grado de formación de la fina capa protectora en la superficie.

En ambas configuraciones de ensayo (semejanza de masa o igualdad de capas), no se apreciaron mejoras en las muestras M2 y M3 respecto de la muestra PURA. Esto es causado principalmente por la temperatura de secado a la que fueron sometidas (50 y 80 grados Celsius, respectivamente).

A bajas temperaturas de secado (50 y 80 grados Celsius), la evaporación de etanol es nula o parcial. Esto tiene efecto adverso sobre la actuación del fluido dilatante durante el ensayo de impacto, y sobre todo cuanto mayor es la energía del mismo. La influencia del alcohol etílico sobre el STF/ aramida es que, por un lado, disminuye la viscosidad de PEG200, reduce la eficiencia del fluido dilatante y, por tanto, empeora el comportamiento reológico de STF; por otro lado, la presencia del etanol en el compuesto STF/aramida disminuye el número de enlaces de hidrógeno entre PEG y SiO_2 . La consecuencia es el aumento de la anchura de corte, esto en la realidad implica mayor daño en el backing material.

En la muestra M6, la temperatura de secado era adecuada (100 grados Celsius). Se apreciaba la existencia de una capa blanca de partículas SiO_2 por las dos caras de la muestra y porque se notaba que la eliminación de alcohol etílico es completa. Ambos resultados indicaban que las telas aramidas de esta muestra fueron reforzadas correctamente.

El otro factor de influencia, también foco de estudio del presente trabajo es el tiempo de mojado de las telas aramida en el baño de STF diluido. El aumento del peso de las telas

tras el proceso de mojado en distintas condiciones de fabricación (10, 30 y 60 minutos de mojado), indican la absorción de fluido.

Dicho incremento no muestra diferencias apreciables en los distintos casos analizados. La explicación a esto es que, el tejido Kevlar 204 g/m² posee un punto crítico de absorción de STF que, a partir de entonces, las fibras ya no eran capaces de retener más partículas. La determinación de este punto crítico de saturación quizás puede ser también un punto interesante para futuros estudios.

5.2 Trabajos futuros

Como continuación de esta línea de investigación, se propone las siguientes actividades:

- Analizar la resistencia de las muestras de STF/aramida ante impacto balístico, y determinar en incremento en el límite balístico de la protección, energía absorbida y aspecto macroscópico/microscópico de las fibras impactadas.
- Utilización de otros tejidos de aramida con diferente densidad areal
- Efecto de la concentración de partículas de sílice en el fluido dilatante en la resistencia ante cuchillo.
- Influencia del alcohol etílico presente en el fluido dilatante sobre la resistencia a carga dinámica de los tejidos aramida reforzados.

REFERENCIAS

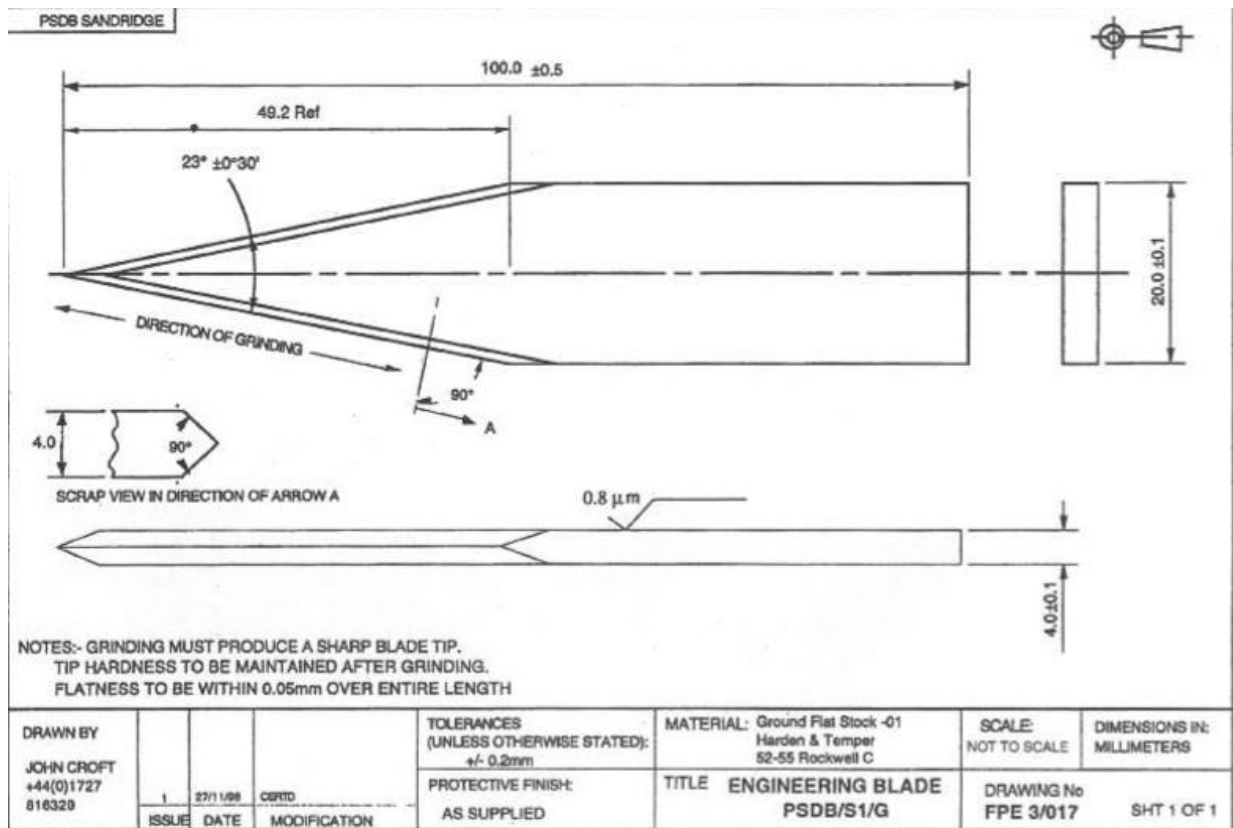
- [1]. ABU BAKAR, I.A., 06. Optimization of Elastic Properties and Weaving Patterns of Woven Composites. *Composite Structures*, .2013, vol. 100, pp. 575-591 ISSN 0263-8223; 18791085.
- [2]. Anonymous., 2014. *El Nylon: No Vamos Hablar De Medias, Pero a Medias, ihablaremos De Ellas!* 4/05/2014, Available from: <https://historiasdeempagues.wordpress.com/2014/05/04/el-nylon/>.
- [3]. Anonymous. *Aramida*. Available from: <https://noelisglez.wordpress.com/aramida/>.
- [4]. Anonymous. *Halloysita*. Available from: <https://www.asturnatura.com/mineral/halloysita/3367.html>.
- [5]. Antonio Miravete., 1995. Fibras de aramida. In: Reverte ed., *Los nuevos materiales en la construcción. Fibras De Aramida*, pp. 26-28 ISBN 8460508234, 9788460508236.
- [6]. BARNES, H.A., 1989. Shear-Thickening ('Dilatancy') in Suspensions of Nonaggregating Solid Particles Dispersed in Newtonian Liquids. *Journal of Rheology*, vol. 33, no. 2, pp. 329-366 ISSN 0148-6055. DOI 10.1122/1.550017.
- [7]. Baezley K. Industrial aqueous suspensions. In: Walters K, editor. *Rheometry: Industrial Application* Chichester: John Wiley & Sons Inc; 1980. P. 339-407.
- [8]. BESEDNJAK, A. and BESEDNJAK, D., Alejandro., 2005. Fibras inorgánicas. In: Univ. Politèc. de Catalunya ed., *Materiales Compuestos. Fibras Inorgánicas*, pp. 44-47 ISBN 8483018209, 9788483018200.
- [9]. BRADY, J.F. and BOSSIS, G., 1988. Stokesian Dynamics. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 01/01; 2018/04, vol. 20, no. 1, pp. 111-157 ISSN 0066-4189. DOI 10.1146/annurev.fl.20.010188.000551.
- [10]. BRENT, J., Maranzano and NORMAN, J., Wagner, 2001. The Effects of Interparticle Interactions and Particle Size on Reversible Shear Thickening: Hard-Sphere Colloidal Dispersions. *Journal of Rheology*, vol. 45, no. 5, pp. 1205-1222 DOI 10.1122/1.1392295.
- [11]. D. P. Kalman, et al., Proceedings of SAMPE 2007. Polymer Dispersion Based Shear Thickening Fluid Fabrics for Protective Applications. Baltimore, MD. ed. , 3-7 June 2007,.
- [12]. DECKER, M.J., et al., 2007. Stab Resistance of Shear Thickening Fluid (STF)-Treated Fabrics. , March 2007, Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353806002983> ISBN 0266-3538. DOI <https://doi.org/10.1016/j.compotech.2006.08.007>.
- [13]. EGRES, R.G. and WAGNER, N.J., 2005. The Rheology and Microstructure of Acicular Precipitated Calcium Carbonate Colloidal Suspensions through the Shear Thickening Transition. *Journal of Rheology*, vol. 49, no. 3, pp. 719-746 ISSN 0148-6055. DOI 10.1122/1.1895800.
- [14]. Eric D. Wetzel, et al., 2004. *The Effect of Rheological Parameters on the Ballistic Properties of Shear Thickening Fluid (STF)-Kevlar Composites*. AIP Conference Proceedings ed., , June 13-17 (2004),.
- [15]. FARR, R.S., MELROSE, J.R. and BALL, R.C., 1997. Kinetic Theory of Jamming Hard-Sphere Startup Flows. *Physical Review E - Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics*, vol. 55, no. 6, pp. 7203-7211 ISSN 1063-651X. DOI 10.1103/PhysRevE.55.7203.
- [16]. FERNANDEZ, N., et al, 2013. Microscopic Mechanism for Shear Thickening of Non-Brownian Suspensions. *Physical Review Letters*, vol. 111, no. 10, pp. 108301 ISSN 0031-9007. DOI 10.1103/PhysRevLett.111.108301.
- [17]. Fiber Line., 2018. Available from: <https://www.fiber-line.com/en/>.
- [18]. GU, J., 02. Improving the Stab-Resistance Performance of Ultra High Molecular Weight Polyethylene Fabric Intercalated with Nano-Silica-Fluid. *Shanghai Jiao Tong Da Xue Xue Bao*, .2014, vol. 19, no. 1, pp. 102-109 ISSN 1007-1172.
- [19]. GÜRGEN, S., KUŞHAN, M.C. and LI, W., 2017. *Shear Thickening Fluids in Protective Applications: A Review*. , December 2017, [viewed 4/7/2018 3:21:48 AM]. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079670017300035> ISBN 0079-6700. DOI <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2017.07.003>.

- [20]. GÜRGEN, S., KUŞHAN, M.C. and LI, W., 2016. The Effect of Carbide Particle Additives on Rheology of Shear Thickening Fluids. *Korea-Australia Rheology Journal*, vol. 28, no. 2, pp. 121-128 ISSN 1226-119X. DOI 10.1007/s13367-016-0011-x.
- [21]. GÜRGEN, S., LI, W. and KUŞHAN, M.C., 2016. The Rheology of Shear Thickening Fluids with various Ceramic Particle Additives. *Materials & Design*, vol. 104, pp. 312-319 ISSN 0264-1275. DOI 10.1016/j.matdes.2016.05.055.
- [22]. H. N. Choi, et al., 2011. Stab Resistance of Aramid Fabrics Reinforced with Silica STF. Jeju Island, Korea ed. 18th International Conference on Composites Materials (ICCM): , January 2011,.
- [23]. HOFFMAN, R.L., 1974. Discontinuous and Dilatant Viscosity Behavior in Concentrated Suspensions. II. Theory and Experimental Tests. *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 46, no. 3, pp. 491-506 ISSN 0021-9797. DOI 10.1016/0021-9797(74)90059-9.
- [24]. HOFFMAN, R.L., 1972. Discontinuous and Dilatant Viscosity Behavior in Concentrated Suspensions--1. Observation of a Flow Instability. *Trans Soc Rheol*, vol. 16, no. 1, pp. 155-173.
- [25]. HOFFMAN, R., 1998. Explanations for the Cause of Shear Thickening in Concentrated Colloidal Suspensions. *Journal of Rheology*, vol. 42, no. 1, pp. 111-123 ISSN 0148-6055.
- [26]. HWANG, H.N., LEE, J.Y., KIM, Y.W. and KIM, Y.H., 2011. *Preparation of Silica-Coated MWNTs and their Addition to Shear Thickening Fluid of silica/PEG Suspension*. Available from: http://uc3m.summon.serialssolutions.com/2.0.0/link/0/eLvHCXmwtV3NT4MwFG-MXkw8aJzZ_Ii96GWBzYIMdp6WODTNkDhDdiM2kh0YxkQ_fN9D8bH0B08mJCGFCjtr1_vr7XR4jC5K5UGxMMVXN7rnbjAkvSDRW6iWr4KheGUFmPd9FWefqoDke6bRtW7u290ynj_rXiIQ6qHg1p_1D5RaIQAffQBCCERgBhjR_OhU99PvjmtSvtPFLdwpwQEDFLrBFGc5qjYja8Wz08EzXhkFKOSTvNBFpjg2nydRroMzrNqonJS-CYQ2QlfZbdSmf-ep7EV8JIFfpgFFsgbDdpRES9ShL7UBzM-1CNuUi22IXF1ILoj32qv0VLZ_xJhVScZ6jN04Abs2MxX6goqmazo6H7zGIs_9wIvv-EJ6fUH7eSBxuBh_GuFpr164TKIKQ5gckkaJK7WKqjgiO3xxTN4qMNJO0A0YaQojBRhpCiPNYaRxSFMYaQkjTWEs0-gAiLQEsUEu7weTvillWXS2WEiTIE0dkIOXLrQWMSp9aPfJJR7OnOfByycearwxWzmKtC-HfN9lgt3qWotc1ZJjTsScrgPjOhS-gsWsE3_FLdLc9tvT7Y_OyH4mQcfrnOwJaIH8quwmnjL_Bgr6QtA.
- [27]. JIANG, W., et al, 2010. Shear-Thickening Behavior of Polymethylmethacrylate Particles Suspensions in glycerine–water Mixtures. *Rheologica Acta*, vol. 49, no. 11, pp. 1157-1163 ISSN 0035-4511. DOI 10.1007/s00397-010-0486-1.
- [28]. LAHA, A. and MAJUMDAR, A., 2016. Interactive Effects of p-Aramid Fabric Structure and Shear Thickening Fluid on Impact Resistance Performance of Soft Armor Materials. , 5 January 2016, Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127515304871> ISBN 0264-1275. DOI <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.077>.
- [29]. LAUN, H., et al, 1992. Rheological and Small-Angle Neutron-Scattering Investigation of Shear-Induced Particle Structures of Concentrated Polymer Dispersions Submitted to Plane Poiseuille and Couette-Flow. *Journal of Rheology*, vol. 36, no. 4, pp. 743-743 ISSN 0148-6055. DOI 10.1122/1.550314.
- [30]. LEE, B., KIM, I. and KIM, C., 2009. The Influence of the Particle Size of Silica on the Ballistic Performance of Fabrics Impregnated with Silica Colloidal Suspension. *Journal of Composite Materials*, vol. 43, no. 23, pp. 2679-2698 ISSN 0021-9983. DOI 10.1177/0021998309345292.
- [31]. LEE, Y.S., WETZEL, E.D. and WAGNER, N.J., 2003. The Ballistic Impact Characteristics of Kevlar® Woven Fabrics Impregnated with a Colloidal Shear Thickening Fluid. *Journal of Materials Science*, vol. 38, no. 13, pp. 2825-2833 ISSN 0022-2461. DOI 10.1023/A:1024424200221.
- [32]. Lee, 2003. Dynamic Properties of Shear Thickening Colloidal Suspensions. *Rheologica Acta*, vol. 42, no. 3, pp. 199 ISSN 14351528; 0035-4511.
- [33]. LI, K., 2012. Shear Thickening Processing Bears on Knitted Fabric of Stab'Resistant of Performance. DongHua University: DongHua University, 01/2012,.
- [34]. Lidia., 2016. *Métodos De Síntesis De Nanotubos De Carbono*. 18/01/2016, Available from: <https://lidiakonlaquimica.wordpress.com/2016/01/18/metodos-de-sintesis-de-nanotubos-de-carbono/>.

- [35]. LIU, J. and XIONG, D., 2015. Surface Adsorption Properties of Silica Nanoparticles in Three-Phase Suspensions. School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nnjing 210094, China, Apr.2015, vol. 36, no. 4, pp. 592-595 DOI 10.3969/j.issn.1006-7043.201404011.
- [36]. MAJUMDAR, A., LAHA, A., BHATTACHARJEE, D. and BISWAS, I., 2017. Tuning the Structure of 3D Woven Aramid Fabrics Reinforced with Shear Thickening Fluid for Developing Soft Body Armour. , 15 October 2017, Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822317308899> ISBN 0263-8223. DOI <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.07.018>.
- [37]. MARANZANO, B.J. and WAGNER, N.J., 2001. The Effects of Particle Size on Reversible Shear Thickening of Concentrated Colloidal Dispersions. *Journal of Chemical Physics*, vol. 114, no. 23, pp. 10514-10527 ISSN 0021-9606. DOI 10.1063/1.1373687.
- [38]. MICHELLE, E., 2013. *Aramididas (Nomex y Kevlar)*. 8th April 2013, Available from: <http://todosobrelasfibrassinteticas.blogspot.com.es/2013/04/aramidas-nomex-y-kevlar.html>.
- [39]. MOTT, R.L., 2006. *Mecánica De Fluidos*. 6ª ed. México; España: Pearson education ISBN 9789702608059; 9702608058.
- [40]. NILAKANTAN, G., et al. *An Experimental and Numerical Study of the Impact Response (V50) of Flexible Plain Weave Fabrics: Accounting for Statistical Distributions of Yarn Strength*. 1st Joint US-Canada Conference on Composites, 24th Annual ASC Technical Conference, University of Delaware ed., Newark, DE, USA ed. , September 2009,.
- [41]. NORMAN, J.W. and JOHN, F.B., 2009. Shear Thickening in Colloidal Dispersions. *Physics Today*, October 2009, vol. 62, no. 10, pp. 27-32 DOI 10.1063/1.3248476.
- [42]. PANIAGUA MERCADO, A.M., MÉNDEZ SÁNCHEZ, A.F. and PÉREZ-TREJO, L., 2010. Determinación De La Viscosidad De Fluidos Newtonianos y no Newtonianos (Una Revisión Del Viscosímetro De Couette). *Latin-American Journal of Physics Education*, vol. 4, no. 1 ISSN 1870-9095.
- [43]. PARK, B.J., FANG, F.F. and CHOI, H.J., 2010. Magnetorheology: Materials and Application. *Soft Matter*, vol. 6, no. 21, pp. 5246-5253 ISSN 1744-683X. DOI 10.1039/c0sm00014k.
- [44]. PASSEY, P., 2016. Study of Pre-Shearing Protocol and Rheological Parameters of Shear Thickening Fluids Containing Nano Particles. R. MEHTA ed., University Patiala Punjab India: Department of chemical Engineering Thapar University Patiala-147004, Punjab.
- [45]. PETERS, I. and JAEGER, H., 2014. Quasi-2D Dynamic Jamming in Cornstarch Suspensions: Visualization and Force Measurements. *Soft Matter*, vol. 10, no. 34, pp. 6564-6570 ISSN 1744-683X. DOI 10.1039/c4sm00864b.
- [46]. QIN, J., ZHANG, G. and SHI, X., 2017. Shear Thickening Fluids and their Composites. School of Science, Northwestern Polytechnical University, XiAn, vol. 31, no. 4, pp. 59-64 DOI 10.11896/j.issn.1005-023X.2017.07.009.
- [47]. SETO, R., MARI, R., MORRIS, J. and DENN, M., 2013. Discontinuous Shear Thickening of Frictional Hard-Sphere Suspensions. *Physical Review Letters*, vol. 111, no. 21, pp. 218301 ISSN 0031-9007. DOI 10.1103/PhysRevLett.111.218301.
- [48]. SHA, X., 2013. Preparation and Properties Research of Shear Thickening Fluid. JianNan University: JianNan University, 9/12/2013,.
- [49]. SHENOY, S.S. and WAGNER, N.J., 2005. Influence of Medium Viscosity and Adsorbed Polymer on the Reversible Shear Thickening Transition in Concentrated Colloidal Dispersions. *Rheologica Acta*, vol. 44, no. 4, pp. 360-371 ISSN 0035-4511. DOI 10.1007/s00397-004-0418-z.
- [50]. Swarna, PATTANAYEK, S.K. and GHOSH, A.K., 2018. Dynamic Shear Rheology of Colloidal Suspensions of Surface-Modified Silica Nanoparticles in PEG. *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 20, no. 3, pp. 1-19 ISSN 1388-0764. DOI 10.1007/s11051-017-4121-2.
- [51]. W. BILLMEYER, F., 1975. Estructura y propiedades del volumen de los polímeros. Morfología y orden en los polímeros cristalinos. In: Ciencia de los polímerosreimpresa ed. Reverte. *Estructura y Propiedades Del Volumen De Los Polímeros. Morfología y Orden En Los Polímero Cristalinos*, pp. 141-164 ISBN 8429170480, 9788429170481.

- [52]. WANG, X. and GORDANINEJAD, F., 2006. Study of Magnetorheological Fluids at High Shear Rates. *Rheologica Acta*, vol. 45, no. 6, pp. 899-908 ISSN 0035-4511. DOI 10.1007/s00397-005-0058-y.
- [53]. WARREN, J., et al, 2015. Effect of Temperature on the Shear-Thickening Behavior of Fumed Silica Suspensions. *Acs Applied Materials & Interfaces*, vol. 7, no. 33, pp. 18650-18661 ISSN 1944-8244. DOI 10.1021/acsami.5b05094.
- [54]. XU, Y., et al, 2007. Preparation and Characterization of Shear Thickening Fluid. *Chinese Journal of Chemical Physics* ed., vol. 38, pp. 3904-3906 DOI 1001-9731(2007).
- [55]. YANG, Y. and CHEN, X., 2016. Study of Energy Absorption and Failure Modes of Constituent Layers in Body Armour Panels. , 1 August 2016, Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836816305236> ISBN 1359-8368. DOI <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.04.071>.
- [56]. Y. S. Lee, E. D. Wetzel, R. G. Egres Jr. and N. J. Wagner., 2002. *Advanced Body Armor Utilizing Shear Thickening Fluids*. 23rd Army Science Conference ed., Orlando, FL. ed. , December 2-5,.
- [57]. YU, K., et al, 2012. Shear-Thickening Behavior of Modified Silica Nanoparticles in Polyethylene Glycol. *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 14, no. 3, pp. 1 ISSN 1388-0764. DOI 10.1007/s11051-012-0747-2.
- [58]. 伍秋美(Qiu-Mei Wu), et al, 2006. 分散介质和温度对 sio2 分散体系流变性能的影响. *中南大學學報 (自然科學版)* , vol. 37, no. 5, pp. 862-866 AirtitiLibrary.
- [59]. 伍秋美, et al, 2007. Viscoelastic Properties of Monodisperse Spherical Silica Suspension. *Journal of Central South University of Technology*, vol. 14, no. 6, pp. 737-741 ISSN 1005-9784. DOI 10.1007/s11771-007-0140-y.
- [60]. 山磊, et al, 2015. 分散介质和温度对纳米二氧化硅胶体剪切增稠行为的影响?. *物理学报* , no. 2015 年 06, pp. 068301-1-068301-8 AirtitiLibrary.
- [61]. 熊芳, et al, 2013. Kevlar 纤维布/剪切增稠液复合材料制备及防刺性能. *四川兵工学报*, no. 2013 年 04, pp. 130-133,148 AirtitiLibrary.

APÉNDICE A



Engineered Knife Blade S1

APÉNDICE B

S1 Knife Blade Penetration Depths from Witness Paper Cut Length
for 0° Angle of Incidence

| Length (mm) | Depth (mm) | Length (mm) | Depth (mm) | Length (mm) | Depth (mm) | Length (mm) | Depth (mm) |
|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|
| 0.41 | 1 | 5.70 | 14 | 10.98 | 27 | 16.27 | 40 |
| 0.81 | 2 | 6.10 | 15 | 11.38 | 28 | 16.67 | 41 |
| 1.22 | 3 | 6.51 | 16 | 11.79 | 29 | 17.08 | 42 |
| 1.63 | 4 | 6.92 | 17 | 12.20 | 30 | 17.49 | 43 |
| 2.03 | 5 | 7.32 | 18 | 12.60 | 31 | 17.89 | 44 |
| 2.44 | 6 | 7.73 | 19 | 13.00 | 32 | 18.30 | 45 |
| 2.85 | 7 | 8.13 | 20 | 13.42 | 33 | 18.71 | 46 |
| 3.25 | 8 | 8.64 | 21 | 13.82 | 34 | 19.11 | 47 |
| 3.66 | 9 | 8.90 | 22 | 14.23 | 35 | 19.52 | 48 |
| 4.07 | 10 | 9.31 | 23 | 14.64 | 36 | 20.00 | 49 |
| 4.47 | 11 | 9.76 | 24 | 15.05 | 37 | | |
| 4.88 | 12 | 10.16 | 25 | 15.45 | 38 | | |
| 5.29 | 13 | 10.57 | 26 | 15.86 | 39 | | |